

付録F 原子力事故の検証

原子核物理学の専門家として原子力事故を検証する事は非常に重要である。原子炉はすでに工学的な応用が主力であり、サイエンスとしての問題点は見受けられないように思われるし、これまで自分もそう信じて来た。しかしながら、1999年に起こったJCOの臨界事故では核分裂反応が直径45 cm、高さ30 cm程度の小さな空間で現実にも起こったものであり、原子核物理の立場から注意深い検証を行う必要がある。実際、硝酸ウラニル溶液を沈殿槽に移している際、それが45 l程度になった時に突然、臨界状態になったという事であるが、この事故は原子核物理学から見てもそれ程単純な現象とは思われないのである。従って、原子核の核分裂反応を一つ一つ吟味して何故この事故が起こってしまったのかの原因を原子核物理学の事例として調べ検証する事は重要な事であると考えたので、その解析結果を解説する。

F.1 JCOの事故

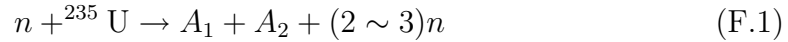
まずJCO作業員が硝酸ウラニル溶液を作り、それを沈殿槽に移す過程を説明しよう。以下の作業過程を1バッチと呼ぶ

- (1) ステンレス容器に8酸化3ウラン (U_3O_8) 2.4 kg, 硝酸 1.7 l を加える
- (2) 全容量が6.5 lになるように純水を加える

この硝酸ウラニル溶液を沈殿槽(直径45 cm, 高さ60 cm)に移してゆく。そして、7バッチ目を注入した時に青い光(チェレンコフ光)が見えたために、臨界状態が起こったと判断された。実際、2人の作業員は重度の中性子被爆被害を受けている。

F.2 核分裂の連鎖反応

ウランなどの重い原子核では中性子を吸収して核分裂する事が実験的に知られている。式で書くと



となる。ここで A_1, A_2 は核分裂でできた新しい原子核をあらわしている。この反応で重要な事が2つある。一つ目は必ず2個か3個の中性子が生成されるという事であり、2つ目はこの核分裂が起こる確率は吸われる中性子のエネルギーがほとんどゼロの場合に最も大きいという実験事実である。

連鎖反応とはこの生成された2個か3個の中性子が再び他の ${}^{235}\text{U}$ に吸われて核分裂反応を起すという現象を言っている。そしてこの核分裂連鎖反応が継続して起こっている状態を臨界という。

通常の原子炉では ${}^{235}\text{U}$ の濃縮度は3~5%と言われているが、ここで使用されたウランは ${}^{235}\text{U}$ が18.8%ある中濃縮ウランである。ちなみに、この濃縮度が90%以上になったものが原子爆弾に利用されている。

F.3 何故、臨界になったのか？

それでは50ℓにも満たない沈殿槽内部で、何故、臨界状態が生じたのであろうか？以下にその主要原因を明らかにして行こう。

F.3.1 最初の中性子源

核分裂の連鎖反応が起こるためには中性子源が必要である。中性子の寿命はせいぜい15分なので、自然界にそのまま存在しているわけではない。このJCOの事故の場合、中性子源は ${}^{238}\text{U}$ の自発核分裂による中性子である。この ${}^{238}\text{U}$ の寿命は約45億年であり、また自発核分裂の割合が 5.45×10^{-7} である。この事を用いると1gの ${}^{238}\text{U}$ が自発核分裂する回数は約0.01回となる。従って1バッチ中では ${}^{238}\text{U}$ が約1.6kg含まれており、1回の自然核分裂で放出される中性子数が1~2であると考えられるので ${}^{238}\text{U}$ は1バッチ中で毎秒、約20個程度の中性子を放出している。

F.3.2 $n-^{235}\text{U}$ 核分裂の平均自由行程（即発中性子）

中性子がウラニル溶液中で ^{235}U と核分裂反応を起こす平均自由行程 (mean free path λ) は

$$\lambda = \frac{1}{\rho\sigma_f} \quad (\text{F.2})$$

と書く事ができる．この平均自由行程の式の導出は Glauber 理論によっている．ここで ρ は ^{235}U の数密度を表し， σ_f は中性子と ^{235}U の核分裂断面積を表している．ここで1バッチ中の ^{235}U の数密度は $\rho \simeq 1.5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ である．一方，中性子と ^{235}U の核分裂断面積 σ_f は入射中性子のエネルギーに強く依存している．実験から，核分裂断面積 σ_f の E_n 依存性は

$$\sigma_f \simeq \begin{cases} 1 \text{ b} & : E_n = 1 \text{ MeV} \\ 585 \text{ b} & : E_n = 0.025 \text{ eV} \end{cases} \quad (\text{F.3})$$

となっている．但し $1\text{b} = 10^{-24} \text{cm}^2$ である．

● 即発中性子の核分裂平均自由行程： 核分裂で放出される中性子（即発中性子）の平均エネルギーは約 1 MeV である事が実験からわかっているので，即発中性子による核分裂の平均自由行程 λ_f は直ぐに計算できて

$$\lambda_f = \frac{1}{\rho\sigma_f} \simeq 67 \text{ m} \quad (\text{F.4})$$

である事がわかる．この平均自由行程は非常に長くこれでは明らかに臨界にはならない．それではどうして臨界状態になり得たのであろうか？

F.3.3 中性子と水分子との衝突

核分裂断面積 σ_f が大きいのは中性子のエネルギーが熱中性子程度に小さい場合である．即ち，中性子がウラニル溶液中でエネルギーを失う場合があれば核分裂の平均自由行程は小さくなる．中性子が衝突によりエネルギーを失うためには，同じ大きさの粒子（ここでは陽子）との衝突を考えればよい．それは水分子中の水素原子の陽子である．中性子と陽子の散乱断面積は実験でわかっており，低エネルギーでは角度依存性がほとんど無い事が知られている．

● 中性子－水分子衝突によるエネルギー損失： 中性子が陽子と散乱すると1回の散乱で約半分のエネルギーを失う事が簡単にチェックできる．式で書くと

次のようになる．入射中性子のエネルギーとその運動量を E_n, p とし，陽子は静止状態とする．この時，散乱後の中性子のエネルギーとその運動量を E'_n, k とすると，エネルギーと運動量の保存則より

$$\frac{p^2}{2M} = \frac{k^2}{2M} + \frac{(p-k)^2}{2M} \quad (\text{F.5})$$

となる．これは直ぐに解けて

$$k = p \cos \theta \quad (\text{F.6})$$

と求まる．この断面積は s -波散乱がほとんどのため角度 θ に依らない事が実験でもわかっているので角度で平均すると

$$E'_n = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{p^2}{2M} \cos^2 \theta d\theta = \frac{1}{2} E_n \quad (\text{F.7})$$

となり，1回の散乱で中性子は約半分のエネルギーを失う事になっている．

● 中性子－水分子衝突の平均自由行程：ここで中性子が1バッチ中で陽子と散乱する場合の中性子の平均自由行程を計算しよう．1バッチ中の陽子の数密度は $\rho_p \simeq 4.9 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ である．低エネルギーでの中性子－陽子散乱断面積は実験で $\sigma_{np} \simeq 20 \text{ b}$ とわかっている．従って，中性子が1バッチ中で陽子と散乱する平均自由行程は

$$\lambda_p = \frac{1}{\rho_p \sigma_{np}} \simeq 1 \text{ cm} \quad (\text{F.8})$$

となる．この事よりこの溶液中において 1 MeV の即発中性子が約 25 cm 進むとそのエネルギーは $E'_n = 1 \text{ MeV} \times \left(\frac{1}{2}\right)^{25} \simeq 0.03 \text{ eV}$ となる．但しこの 25 cm の距離は直線とは限らないが，確かにこの中性子は熱中性子そのものである．

F.3.4 $n-^{235}\text{U}$ 核分裂の平均自由行程（熱中性子）

この熱中性子が1バッチ中で核分裂をするための平均自由行程は簡単に計算できる．今の場合， $\sigma_f = 585 \text{ b}$ である事から

$$\lambda_f = \frac{1}{\rho \sigma_f} \simeq 11 \text{ cm} \quad (\text{F.9})$$

となる．これより 1 MeV の即発中性子が 25 cm 進んで熱中性子になり，これが 11 cm 進むと次の核分裂反応を起こす事になっている．40 ℓ のウラニル溶液を沈殿槽に入れた場合，直径が 45 cm で高さが 25 cm 程度になる事を考えると確かに沈殿槽内部で連鎖反応が急速に進む可能性が高い事を示している．

F.3.5 中性子の核反応時間

即発中性子が 36 cm 進むと核分裂反応が起こる事がわかったので、その中性子がこの距離を進むために要する時間を見積もる必要がある。核分裂反応自体は恐らくは 10^{-15} 秒程度と考えられるのでこれは無視しても十分である。

即発中性子の平均エネルギーは 1 MeV であり、この中性子が 1 cm 進むのに要する時間は $\tau_0 \simeq 7.6 \times 10^{-10}$ 秒である。その後、1 cm 進む毎にエネルギーが半分になるので、掛かる時間は $\sqrt{2}$ だけ増えてゆく。従って、25 cm 進むと全時間は $T_0 = (1 + \sqrt{2} + \dots + 2^{\frac{25}{2}})\tau_0 \simeq 15 \mu$ 秒と求まる。この後、熱中性子は 11 cm 進むのだが、この時のエネルギーは 0.03 eV である。従って、熱中性子が 11 cm 進む時間は $\tau_{th} \simeq 46 \mu$ 秒となる。これより、即発中性子が次の核分裂反応を起すまでの時間は $T_{tot} \simeq 61 \mu$ 秒となる。

F.4 臨界時の総エネルギー

この臨界状態での総エネルギーはどのくらいなのであろうか？この評価は非常に難しいが、大雑把な値を求めてみよう。まず、最初の仮定として、再利用される中性子数を $n_r = 1.001$ と取ってみよう。これは大変難しい所であるが、まずは試みとして計算するという事である。原子炉では勿論この値が $n_r = 1$ となるように調整している。ここで核分裂が何回起こったとすれば良いかが問題である。ここでは核分裂数が $N = 40000$ 回と仮定する。この時、核分裂が起こっていた時間は $T_f \simeq 2.4$ 秒であり、また核分裂総数は

$$N_{tot} = 1.001^{40000} \simeq 2.3 \times 10^{17} \quad (\text{F.10})$$

と求まる。最初に ^{238}U の自発核分裂による中性子数は 1 バッチでは約 20 個であったので、そのうち半分が利用されたとしよう。さらに 1 個の核分裂で約 200 MeV のエネルギーが解放されるのでこの場合の全エネルギーは $E_{tot} \simeq 4.6 \times 10^{26}$ eV となり、これは計算機シミュレーションで求められた値に近いものである。

F.5 臨界は何故止まったか？

これまで見たように、確かに JCO の事故では臨界に達して膨大な核エネルギーが放出された事がわかり、重大な中性子被爆が起こった事が良くわかるものである。しかしここで深刻な疑問にぶつかる。それは臨界は何故止まったのか？

と言う事である．単純に考える限り上記の連鎖反応を止めるには別の理由が必要である．それでは臨界は、何故、止まったのであろうか？何故 1 回のバーストで終了したのであろうか？

F.5.1 7 バッチ目の核分裂

この答は恐らくは以下のものであろう．それはウラン化合物は水や硝酸よりも相当に重いのでウランは秒単位の時間を経て沈殿槽の下方に沈殿するものと考えられる．この場合、恐らくは 20% 程度の体積内にウランは沈殿するものと仮定してもそれ程間違える事はないと思われる．従って、6 バッチ目を終了した段階ではウランは沈殿槽の下から 4.9 cm までに沈殿したと仮定しよう．つまりその上の 19.7 cm の所に水が存在していたと考えて良い．この場合の計算をした結果が

$$E_{tot} \simeq 4.6 \times 10^{26} \text{ eV} \simeq 7.4 \times 10^7 \text{ J} \quad (\text{F.11})$$

となったわけである．前述したように、この核分裂反応が継続した時間は全体で大雑把に言って

$$T_f \simeq 2.4 \text{ 秒} \quad (\text{F.12})$$

であったと計算されているが、これはウランが下方に落下する時間に対応しているものと考えられる．

同様な計算を 6 バッチ目に対しても実行した所、6 バッチ目の総エネルギーはこれよりも約 1000 倍小さいものであった．しかし小さいながらも 6 バッチ目でバーストはすでに起こっていたと考えられる．

いずれにせよ、臨界が止まった物理的な理由が確かにあったのである．ウランが下に落下してしまった段階では、下方にたまったウランの回りに水は無く、従って、核分裂が起こっても即発中性子がエネルギーを簡単には失う事が出来なく、それゆえ、もはや臨界には到底なり得ないと言う事である．

F.5.2 8 バッチ目の核分裂

これから先は、現実には起こった事ではないが、状況を考えれば起こったとしても不思議ではない、極めて深刻な問題を議論しよう．もし、8 バッチ目が投入されていたと仮定しよう．この場合ウランが関与する総数はウランが落下す

る時間 (水の高さ) に比例するから大雑把に言って $\frac{22.9}{19.7}$ 倍だけ増える．よって

$$N = 40000 \times \frac{22.9}{19.7} \simeq 46500 \quad (\text{F.13})$$

となっている．従って核分裂総数は

$$N_{tot} = 1.001^{46500} \simeq 1.5 \times 10^{20} \quad (\text{F.14})$$

と求まり，その全エネルギーは $E_{tot} \simeq 3 \times 10^{29} \text{ eV}$ となっている．これは $E_{tot} \simeq 4.8 \times 10^{10} \text{ J}$ ，即ち 11 トンの TNT 火薬に相当するエネルギーである．この場合は明らかに中性子被爆だけでは済まされなかった事になる．チェルノブイリの事故が約 100 トンの TNT 火薬に相当すると言われているが，この 8 バッチ目のエネルギーの大きさから考えてみるとチェルノブイリの事故なみの被害になった可能性が否定できないものである．

F.5.3 核燃料濃縮度で事故は起こったか？

JCO の事故は現実には起こってしまったが，通常の核燃料の場合，このような事故が起こったかどうかを検証することは非常に重要である．実際問題としては，以下に見るように，この事故の主な原因が濃縮度にあった事がわかる．このことは重大な意味を持っていて，実はこの事故に関しては，科学者に責任が全くなかったとは言えないと思われる．少なくとも濃縮度の重要性をきちんと具体的な計算で示しておく必要があったことは明らかであろう．

● JCO 事故のウラン濃縮度と核分裂数： これまで議論してきたように JCO 事故のウラン濃縮度は 18.8% である．この場合，核分裂数は $N^{JCO} \simeq 40000$ と仮定されて計算されている．

● 核燃料のウラン濃縮度と核分裂数： 一方，通常の核燃料ではウラン濃縮度が 5% 以下のものが利用されている．濃縮度 5% とした場合，核分裂が起こる平均自由行程は $\lambda_f^{Reactor} \simeq 41.4 \text{ cm}$ である．一方，JCO 事故の場合， $\lambda_f^{JCO} \simeq 11 \text{ cm}$ であった．核分裂で生成された中性子が熱中性子になるための平均自由行程は $\lambda_{th-n} \simeq 25 \text{ cm}$ であった．従って，通常の核燃料を使った場合の核分裂数は大雑把に言って

$$N^{Reactor} \simeq 40000 \times \frac{\lambda_f^{JCO} + \lambda_{th-n}}{\lambda_f^{Reactor} + \lambda_{th-n}} \simeq 21687$$

となる．従って，臨界状態になったとした時の全核分裂総数は

$$N_{tot}^{Reactor} \simeq 1.001^{21687} \simeq 2.6 \times 10^9$$

となる．これは JCO の事故の場合の $N_{tot}^{JCO} \simeq 2.3 \times 10^{17}$ と比べると 8 桁近く小さい数になっている．エネルギーで書き直すと

$$\begin{aligned} JCO : \quad E_{tot}^{JCO} &\simeq 4.7 \times 10^{26} \text{ eV} \simeq 7.4 \times 10^7 \text{ J} \\ Reactor : \quad E_{tot}^{Reactor} &\simeq 5.2 \times 10^{18} \text{ eV} \simeq 0.8 \text{ J} \end{aligned}$$

となっている．これから見て明らかなように，通常の核燃料物質であったならば JCO の事故は起こらなかったのである．濃縮度がこれだけ大きな影響をするという事実を原子炉関係の専門家のみならず，原子核物理学者も十分な認識ができていなかったと思われる．今後，十分な注意とともに，さらにより正確な核分裂反応の研究が必要であると言えよう．

F.6 まとめ

原子核分裂を応用した原子炉は工学的にはかなり安全なものと考えられるし，実際，原子炉関係の事故はむしろ少ない方であると言ってよい．しかしながら，原子炉に関連する問題は原子核物理学として全て理解されているかと言うと，実はそうではない事がわかったという事である．福島原発事故は確かに原子炉そのものの事故というよりも電気系統が完全破壊された場合の事故と考えられている．しかしながら，使用済み核燃料があれば大量の放射線が放出されている事は明らかであり，この放射線による水蒸気破壊の事は良く知られていた事実でもある．この点でも放射性原子核の事を正確に知っている事が原子炉関係では非常に重要である．さらに，核分裂の理論自体もまだ十分理解されているとは到底言えないものである．実際，例えば熱中性子で ^{235}U は核分裂を起すが ^{238}U は起さないという実験事実さえも理論的にはこれまできちんとは理解できてはいなかったのである．これからしばらく(数十年)は原子炉が稼動するものと思われるが，その場合，原子核物理学の研究者はさらにより深くその周辺の物理を理解するべく努力する必要があると思われる．

関連図書

- [1] Fields and Particles
K. Nishijima, W.A. Benjamin, INC, 1969
- [2] Symmetry and Its Breaking in Quantum Field Theory
T. Fujita, Nova Science Publishers, 2011 (2nd edition)
- [3] Fundamental Problems in Quantum Field Theory
T. Fujita and N. Kanda, Bentham Publishers, 2013
- [4] Bosons after Symmetry Breaking in Quantum Field Theory
T. Fujita, M. Hiramoto and H. Takahashi
Nova Science Publishers, 2009
- [5] New Fundamentals in Fields and Particles
T. Fujita (editor), Transworld Research Network, 2008
- [6] J.D. Bjorken and S.D. Drell, “Relativistic Quantum Mechanics”,
(McGraw-Hill Book Company,1964)
- [7] J.J. Sakurai, ”Advanced Quantum Mechanics”, (addison-Wesley,1967)
- [8] B.W. Parkinson and J.J. Spilker, ”Global Positioning System”, Progress
in Astronautics and Aeronautics (1996)
- [9] Simon Newcomb, ”Tables of the Four Inner Planets”, 2nd ed. (Washing-
ton: Bureau of Equipment, Navy Dept., 1898).
- [10] B.G. Bills and R.D. Ray. (1999), “ Lunar Orbital Evolution: A Synthesis
of Recent Result