

JCO 事故の再検証

日大生産工 ○大島 佐知子

1 JCOの事故

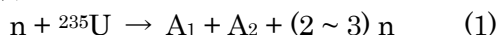
原子力関連の事故としてよく調べられているのはJCO の臨界事故の問題である。この事故は1999 年に茨城県にある(株) ジュー・シー・オー (JCO) 内の転換試験棟という施設において中濃縮ウラン化合物(ウラン濃縮度は18.8%)の製造工程で発生した臨界事故である。まずJCO 作業員が硝酸ウラニル溶液を作り、それを沈殿槽に移す過程を説明する。以下の作業過程を1 バッチと呼ぶ。

- (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 になるよう純水を加える。
- (3) この硝酸ウラニル溶液を沈殿槽に移す。

事故は7 バッチ目の注入時に起き、この時に青い光(チェレンコフ光)が見えたので臨界状態が起これたと判断された。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。沈殿槽(直径45cm, 高さ60cm)という小さな容器内でどのようにして原子核分裂の連鎖反応が進行したのかと言う問題の解析はこれまで幾つかの研究がなされている。これらの解析は主に計算機シミュレーションであり、その結果は事故での観測量(γ 線量など)をよく再現している。しかし、ここでは原子核物理学における多重散乱理論の立場から解析を行い、再検証する。現実に臨界が起これっており、臨界になってしまったミクロの過程を詳細に追う必要があると考える。そして何故、連鎖反応が継続し得たのかを原子核反応論における平均自由行程の言葉で検証し再現して行く。

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 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。

3 何故、臨界になったのか？

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15分程度なので、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と考えられる。 ${}^{238}\text{U}$ 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。この事より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個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事がわかる。

中性子がウラニル溶液中で ${}^{235}\text{U}$ と核分裂反応を起こす確率を多重散乱理論に基づいた平均自由行程 λ で求める。この平均自由行程は

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

と書く事ができる。ここで ρ は ${}^{235}\text{U}$ の数密度を表し、 σ_f は中性子と ${}^{235}\text{U}$ の核分裂断面積を表している。この1バッチ中の ${}^{235}\text{U}$ の数密

Re-examination of JCO Accident

Sachiko OSHIMA

度は $\rho \sim 1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 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

$$\begin{aligned} \sigma_f &\sim 585 \text{ b} : E_n \sim 0.025 \text{ eV} \\ \sigma_f &\sim 1 \text{ b} : E_n \sim 1 \text{ MeV} \quad (3) \end{aligned}$$

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

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、中性子がウラン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。エネルギーと運動量の保存則より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。

次に中性子が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する。1バッチ中の陽子の数密度は $\rho_p \sim 4.9 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ であり、低エネルギーでの中性子-陽子散乱断面積は実験から $\sigma_{np} \sim 20 \text{ b}$ であるので、中性子が1バッチ中で陽子と散乱する平均自由行程は $\lambda_p \sim 1 \text{ cm}$ となる。1 MeV の即発中性子が約 25 cm 進むとするとそのエネルギーは $E'_n \sim 0.03 \text{ eV}$ となる。但しこの 25 cm の距離は直線とは限らない事が散乱過程が角度に依らない事からわかっている。この中性子は確かに熱中性子そのものである。

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今の場合、 $\sigma_f = 585 \text{ b}$ である事から $\lambda_f \sim 11 \text{ cm}$ 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、さらに 11 cm 進むと次の核分裂反応を起こす事になる。40 l のウラン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。

4 まとめ

原子核分裂を応用した原子炉は工学的には十分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、現実はまだ十分理解されたとはとても言えないのが現状である。本研究では原子核分裂の連鎖反応が狭い容器内でどのように進化したかという基本的な問題を散乱問題として捉え、解析したものである。この研究により、臨界の問題を多重散乱の枠組みで理論的に取り扱う重要性が明らかになったが、この事はまだ原子炉における原子核分裂に関してサイエンスとしての研究も無視は出来ない事を示している。

「参考文献」

- 1) 日本原子力学会JCO事故調査委員会, 「JCO臨界事故 その全貌の解明 事実・要因・対応」東海大学出版会 (2005) .
- 2) 山根 祐一, 中島 健, 阿部 仁, 林芳昭, 有澤 潤, 早海 賢, 核燃料施設の事故影響評価手法に関する調査(V) 臨界事故影響の評価手法と試解析, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 9, No. 1 (2010) p. 96-107.
- 3) 舘野淳, 野口邦和, 青柳長紀, 「徹底解明 東海村臨界事故」新日本出版社 (2000) .
- 4) Kotaro Tonoike, Takemi Nakamura, Yuichi Yamane, and Yoshinori Miyoshi, “Power Profile Evaluation of the JCO Precipitation Vessel Based on the Record of the Gamma-Ray Monitor”, Nuclear Technology, 143, (2003) p. 364.
- 5) Yuichi YAMANE, Ken NAKAJIMA, Toshihiro YAMAMOTO and Yoshinori MIYOSHI, “Development of Criticality Accident Analysis Code AGNES”.
- 6) A. Bohr and B.R. Mottelson, “Nuclear Structure, Vol. 1”, World Scientific (1998) .
- 7) 八木浩輔, 原子核物理学, 朝倉書店 (1971) .
- 8) R.J. Glauber, in “Lectures in Theoretical Physics”, ed. W.E. Brittin and L.G. Dunham, New York, Interscience (1959) .
- 9) 岡嶋成晃, 久語輝彦, 森貴正, 原子炉物理学, オーム社 (2012) .
- 10) <http://www.ndc.jaea.go.jp/j40fig/findex.html>
Cross-Section Graphs of JENDL-4.0.