



福島第一原子力発電所2号機格納容器内気体からの短半減期Xeの検出について

1.はじめに

11月2日付けで東京電力から福島第一原子力発電所2号機格納容器内のガスサンプリングにおける核種分析の結果、核分裂に伴って生じる核分裂性核種の一種であり、短半減期の希ガスであるXe133, Xe135が 10^{-5}Bq/cm^3 程度検出された¹との報告がなされた。

(参考)http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_111102_01-j.pdf

本件についての検討結果を以降に示す。

2.結論

検出されたXeは、自発核分裂およびそれに伴う限定的な核分裂により発生したものであると推定され、再臨界によるものであるとは考えにくい。

安全性を考える上で重要なのは核分裂そのものではなく、核分裂による発生する熱エネルギーである。自発核分裂は自然現象であり、また、現状では、発生する熱エネルギーは崩壊熱に比べて無視できるほど小さいため、安全上の問題は無い。

ただし、今後も原子炉の温度と圧力の監視が重要である。また、核分裂生成物の濃度を継続的に監視し、その変動傾向に注意を払う必要がある。

3.検討

現時点までの情報に基づくと、本件に関して二つの可能性が想定される。

- (1)炉心内に存在する核種の自発核分裂とそれに伴う限定的な核分裂によるもの
- (2)非常に低い出力レベルでの再臨界によるもの

以下にそれぞれについて説明する。

- (1)炉心内に存在する核種の自発核分裂とそれに伴う限定的な核分裂によるもの

運転中の原子炉の炉心内には、ウランが中性子を吸収することで生成するプルトニウム(Pu)やキュリウム(Cm)といった物質が存在する。これらの物質の一部は、中性子を吸収し

¹ 10^{-5}Bq/cm^3 とは $100,000(10万)\text{cm}^3$ あたりに毎秒1個の放射線を出すだけの放射性物質が存在していることを示している。これは、きわめて低いレベルであり、一般的な室内に存在する放射性物質であるラドンの濃度と同程度のレベルである。



なくてもまれに「自発的に」核分裂を起こす性質を持っている。これを自発核分裂と呼んでいる。2号機の炉心内において、 $\text{Cm}242$ 、 $\text{Cm}244$ および $\text{Pu}238$ などが自発核分裂し、中性子を発生している状態である²。自発核分裂によって生成される $\text{Xe}133$ 及び $\text{Xe}135$ の濃度が、今回検出された $\text{Xe}133$ および $\text{Xe}135$ と同レベルであることから、自発核分裂そのものにより発生したものであると推定できる(添付 1)。

また、自発核分裂で発生した中性子のうち、一部はウランやプルトニウムなど中性子により核分裂を生じる核種に吸収されることで、二次的な核分裂を引き起こす。原子炉が臨界に達しておらず停止した状態である「未臨界」の状態においても、この二次的な核分裂は生じている(添付 2)。これは、2号機に限らず、停止中の原子炉、さらには、ごく小規模はあるが、天然のウラン鉱が存在するところでも発生している。原子炉が停止している「未臨界」の状態において、上記のような限定的な核分裂により中性子が発生することを「未臨界増倍」と呼んでいる(添付 2 を参照)。今回検出された $\text{Xe}133$ および $\text{Xe}135$ は、この未臨界増倍の過程で発生した核分裂に起因している可能性もある。

なお、原子炉が未臨界、すなわち停止状態の場合、核分裂の連鎖反応は持続することなく終息する。従って、運転時に比べると発生するエネルギーおよび放射性物質の量はきわめて少なく、停止中の原子炉の安全性を脅かす事態には至らない。

(2)非常に低い出力レベルでの再臨界

軽水炉は、ウラン燃料を効率的に利用するために、できる限り核分裂の連鎖反応が生じやすいようにウラン燃料を配置している。過酷事故などにより、燃料の形が損なわれた場合、連鎖反応が持続しにくくなること、また、炉心の損傷過程で制御棒の一部が混入することなどの理由から再臨界が発生する可能性はもともと低いと見ることができる。

万が一、再臨界が起きていると仮定した場合でも、検出された $\text{Xe}133$ 、 $\text{Xe}135$ の濃度がきわめて低いこと、原子炉の圧力・温度に目立った影響が見られないことから、その規模は限定的であり、原子炉の安全性を脅かすエネルギー発生量には至っていないと推定できる。

なお、仮に再臨界が発生したとしても、軽水型原子炉が持つ固有の安全性(再臨界が生じた燃料部分で熱が発生すれば、①周りの水の温度が上昇さらには蒸発する、②燃料の温度が上昇する、この二つがあいまって核分裂が抑制される)により、核分裂の連鎖反応が持続できなくなる。つまり、未臨界になる。このように、再臨界で出力が上昇しても、あるレベル以上には上がらず、温度が下がり臨界条件が満たされると再び温度が上がる、ということを繰り返しながら、安定な状態に収束し、あるレベル以上には出力は上昇しないと推定できる。

以上より、今回検出された Xe は、自然現象である(1)自発核分裂によると考えられ、(2)

² $\text{U}238$ も同様の性質を持っているため、停止中の原子炉のみならず、天然のウラン鉱石などの中で自発核分裂はごくわずかであるが発生している。



再臨界によるものとは考えにくい。

ただし、原子炉の圧力・温度および格納容器内ガスの放射性物質を継続的に監視し、出力上昇を伴う再臨界が発生していないことを確認することは安全上重要である。

添付 1 自発核分裂による Xe 濃度の概算

照射済みの BWR 燃料(燃焼度約 40GWd/t)からは、自発核分裂により 1 秒間に 10^8 個程度の中性子が発生している。一回の核分裂あたりに発生する中性子数は 3 個程度であるため 1 秒間に 3×10^7 回程度の核分裂が発生していると考えられる。炉心内の燃料集合体数は 548 体であるため、炉心全体では、1 秒間に $548 \times 3 \times 10^7 \sim 10^{10}$ 回程度の自発核分裂が生じていると推定できる。一回の核分裂あたりの Xe135 の発生量を数% ($\sim 10^{-2}$) とすると、Xe135 の発生量は炉心全体で 1 秒間に 10^8 個程度であると推定できる。格納容器の体積を $5000\text{m}^3 (= 5 \times 10^9\text{cm}^3)$ とすると、Xe135 の発生数は毎秒 $10^8 \div 5 \times 10^9 \sim 2 \times 10^{-2} (1/\text{cm}^3)$ である。以上より、Xe135 の生成と崩壊が平衡状態であるとすると、おおむね $10^{-2} (\text{Bq}/\text{cm}^3)$ 程度の Xe135 が格納容器内に存在していることになる。格納容器内ガスのサンプリングがチャコールフィルター(捕集効率 10^3 程度)を通した状態で行われていること、窒素封入が行われていることを加味すると、測定結果を矛盾なく説明できる。

(参考) 主要な核種の崩壊定数(1/s)

α 崩壊 : Pu238 : 2.5×10^{-10} 、Cm242 : 4.9×10^{-8} 、Cm244 : 1.2×10^{-9}

自発核分裂 : Pu238 : 4.7×10^{-19} 、Cm242 : 3.1×10^{-15} 、Cm244 : 1.7×10^{-15}

添付 2 停止中の原子炉における自発核分裂とそれに伴う限定的な核分裂

停止中の原子炉においては、Cm や Pu などの自発核分裂により、継続的に中性子が発生している状態である。仮に自発核分裂により発生した中性子を 100 個のパチンコ玉とする。原子炉内に中性子により核分裂を起こす物質が全くない場合を考える。これは、入ると玉が出る「入賞口」が全くない状態であり、100 個の玉は打てばそのままなくなる。すなわち、100 個の中性子はそのまま周りの物質に吸収されて消滅する。

次に、入ると玉が出る「入賞口」があり、100 個の球を打つと、平均して 90 個の玉が出るとする。この場合、

最初の持ち玉 : 100 個

100 個を打った後戻ってくる玉 : 90 個

90 個を打った後戻ってくる玉 : 81 個

...

となり、最初の持ち玉を入れると、「発生」した玉は、

$100+90+81+\dots \sim 1000$

となり、持ち玉の 10 倍となる。



100 個の球を打って平均 50 個の玉が出る場合には、

$$100+50+25+\dots\sim 200$$

となる。

原子炉の場合も同じように考えることができる。中性子が最初に(自発核分裂により)100 個生成されたとする。原子炉が停止、つまり未臨界状態にある場合を考える。この 100 個の中性子が二次的に引き起こした核分裂により、たとえば 90 個が新たに生まれ、その 90 個から 81 個が生まれ・・・、となる。つまり、「核分裂が連鎖的に発生し」、その結果、発生する中性子の数は 1000 個程度になる。停止状態の原子炉においては、このようなメカニズムにより、限定的にはあるが、「持続しない核分裂の連鎖反応」が発生している。これを未臨界増倍と呼んでいる。

ここで重要なことは、未臨界増倍の場合、核分裂が無限に増加しないので、大規模な熱エネルギーが発生することはない、原子炉の安全性を脅かす事態は発生しないことである。

一方、先ほどのパチンコ台をもう一度考える。100 個の玉を打って、100 個の玉が帰ってくる場合を考える。この場合、いつまでもパチンコを打つことができる。原子炉の場合、これが「臨界」に相当する。中性子の数が増えたり、減ったりせず、一定の状態に保たれる。

最後に、100 個の玉を打ったら 110 個の玉が帰ってくる場合を考える。この場合、玉の数は無限に増加する。原子炉の場合、このような状態は臨界を超えた「超臨界」の状態であり、出力が上昇する事態となる。原子炉の安全性からはこのような事態を避ける必要がある。なお、本文中に記載したように、「超臨界」になった場合でも、水の蒸発により大規模な熱エネルギーが発生する可能性は低いとみられるが、冷却の阻害要因になるため、このような状態が生じていないことを放射性希ガスの濃度、原子炉の温度・圧力の監視により確認する必要がある。

改訂来歴

初版：(2011 年 11 月 4 日)

改訂 1：(2011 年 11 月 8 日)添付 1 における核種の半減期を訂正(添付 1 の計算には使用せず)。

改訂 2：(2011 年 11 月 17 日)添付 1 において自発核分裂からの Xe135 の発生量を 1 秒当たりと明示的に記載。核種の半減期にかえて α 崩壊と自発核分裂の崩壊定数を記載。