

再臨界になる可能性はどれ位あるか？

11月始めの「臨界事故誤報事件」が明らかになった後でも、各誌は「炉心状況が分からないのだから、何が起きるか分からない」といったニュアンスで記事を書いています（下記）。確かに「燃料が熔融するなどの酷い状況になっているなら、臨界事故だって起きてても不思議ではない」という声は、記者ならずとも一般人から聞こえてきそうです。

特に、これまで「炉心の冷却はできている」とか「冷温停止」という言葉を聞いて、安心してしまった所へ「キセノン検出（＝臨界？）」というニュースで、不意打ちに合ったように感じるのでしょうか。

朝日新聞 2011/11/4 「臨界なし：手探り」

・・・炉内わからぬまま、臨界の可能性を否定できず・・・

日経新聞 2011/11/18 「炉内部の状況なお不明」

・・・臨界を疑う事象発生・・・

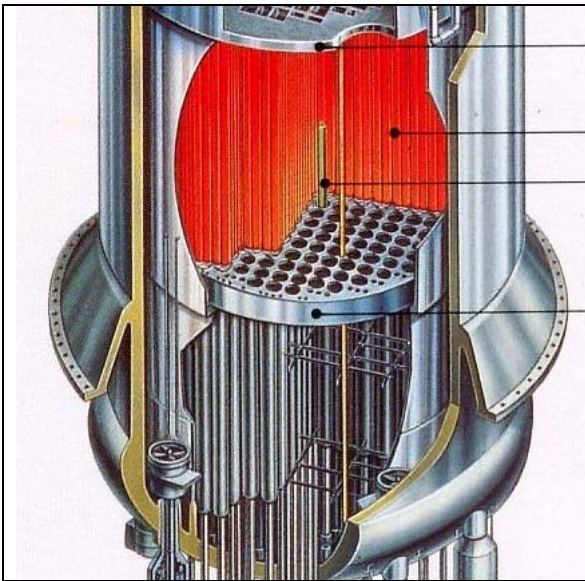
現時点でも、燃料はどういう状況なのか、誰にも分かりません。我々は、TMI（スリーマイル島）原発事故で、燃料が熔融して压力容器底部にかなりの量が落下したことが分かっています。しかし、福島原発で炉心が冷却できなかった時間と、一部の炉心冷却系が作動した時間とを勘案すると、TMIよりひどいのか、それほどでないのか、全く不明です。

燃料の状況が不明なのに、どうして廃炉工程が描けるのか理解できませんが、今後、格納容器にカメラを入れれば、落下した燃料がどうなっているか判明するので、压力容器の中も推測できるでしょう。私も責任ある立場なら「分からない」というべきでしょうが、これを推測しないと「臨界事故は起きない」と断言できません。以下に考えられる燃料状況と、臨界問題の関係を検討してみました。

想定した条件：

- ①燃料は冷却されずに高温になった。
- ②水素が発生したのだから、被覆管は1200度以上だった。
- ③ストロンチウムが検出されているので、燃料はストロンチウム気化温度の約1400度に達したことは間違いない。
- ④燃料（酸化ウラン）の融点2800度に達したかどうかは不明。
- ⑤被覆管が破れて、中の燃料ペレットが（恐らく細粒化して）压力容器底部に落下した。
- ⑥压力容器底部は厚さ16cmもあるが、中性子計装管は厚さが数mmなので、高温の燃料によって破損し、そこから燃料が格納容器底部に落下した。落下した量は不明だが、中性子計装管は直径1cm程度なので、それ程大量の落下ではなさそう。従って、格納容器を貫通し、更に原子炉建屋外へ落下したとは考えにくい。
- ⑦また、大量の発熱が压力容器内で起きているので、燃料の大部分は压力容器内（恐らく底部）にあると考えられる。
- ⑧なお「压力容器に注水するのに、シャワーのように上から散水した方が冷却に効果的であった」という情報があったので、炉心部に燃料がある程度、残っている可能性がある。即ち、もし、压力容器底部に全燃料が落下していれば、どのような注水方法でも冷却効果は同程度なので、シャワー散水が効果的ということは、炉心部に燃料がある程度残っている可能性が考えられる。
- ⑨更に、制御棒はステンレス製で、熔融していないと思われるが、もし、制御棒も熔融していたり、あるいは抜けてしまっていた場合、炉心部に燃料が残っているとすると、臨界の観点では厳しいことになる。特に、炉心の燃料が残っている部分が満水になると、制御棒がない場合には臨界事故となる。
- ⑩福島2号機の炉心燃料は約100トン、比重が10なので、体積で10m³。压力容器底部の面積は約20m²なので、単純計算では、高さ50cmの堆積物となる。しかし、炉心真下の面積は約10m²

なので、これで計算すると、高さ 1m の堆積物となる。1m もの厚さがあると、臨界条件からはかなり厳しいと予想される。

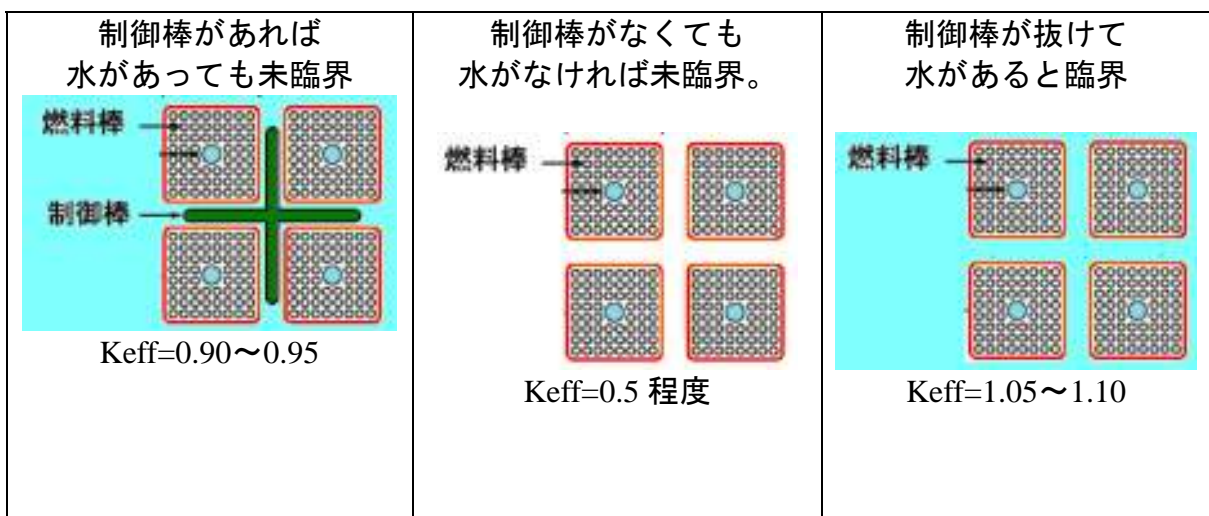


左図は ABWR の炉心部（赤い部分）とその下部である。数百本の制御棒案内管が林立しており、压力容器底部（下部プレナム部）には制御棒駆動機構の上部がある。また、この他に、細い中性子計装系の案内管が数十本あるが、図示されていない。しかし、压力容器底部は、概ね、鍋底のような形状と考えて良い。従って、燃料が落下すると、压力容器底部に堆積する可能性がある。

以上から、燃料の状況として、最も楽観的なケースから、最も悲観的なケースまでを考えて見る。以下の説明は、燃料状況が厳しい場合は、臨界の点からはむしろ楽になる、そして、その逆も成り立つ、ということの説明するものである。

ケース 1（最楽観ケース）：

炉心部に燃料が残っているとする。この場合、制御棒がある限りは臨界にはならない。制御棒はステンレス製で融点が 1400 度程度なので、熔融していないと思われるが、もし、制御棒も熔融していたり、あるいは抜けてしまっていた場合、臨界の観点では厳しいことになる。特に、燃料が残っている部分が満水になると、制御棒がない場合には、計算するまでもなく、臨界事故となる。従って、今後、压力容器を満水にする場合には、制御棒が挿入されていることを確認するか、あるいは、中性子を吸収する硼酸を投入しなければならない。



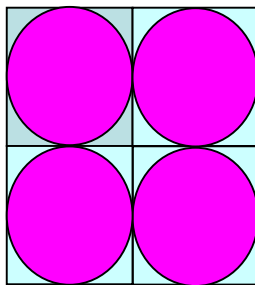
ここで、 K_{eff} とは、実効増倍率と呼ばれる指標で、 $K_{eff} = 1$ なら臨界、 $K_{eff} < 1$ なら未臨界、 $K_{eff} > 1$ なら臨界を越えている、ということである。

ケース 2 (楽観ケース) :

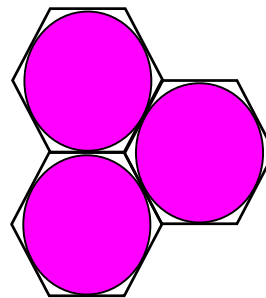
燃料ペレットがそのまま全量、圧力容器底部に落下したケースを考える。燃料集合体の下部は、下図(中央)のように、多数の穴が開いていて、燃料ペレットの大きさでは通過できない。しかし、燃料ペレットが燃料集合体下部に落下して堆積し、その発熱で、ステンレス製の下部タイププレートを熔融して落下したとする。つまり、圧力容器底部に、燃料ペレットがそのまま堆積した場合を考える。



最も単純に、燃料ペレットが正方格子のまま落下したとすると、最充填密度は約 75% なので、水と燃料の体積比は 0.33 である。



一方、三角格子のように充填されると仮定すると、最充填密度は約 90% なので、水と燃料の体積比は約 0.1 である。



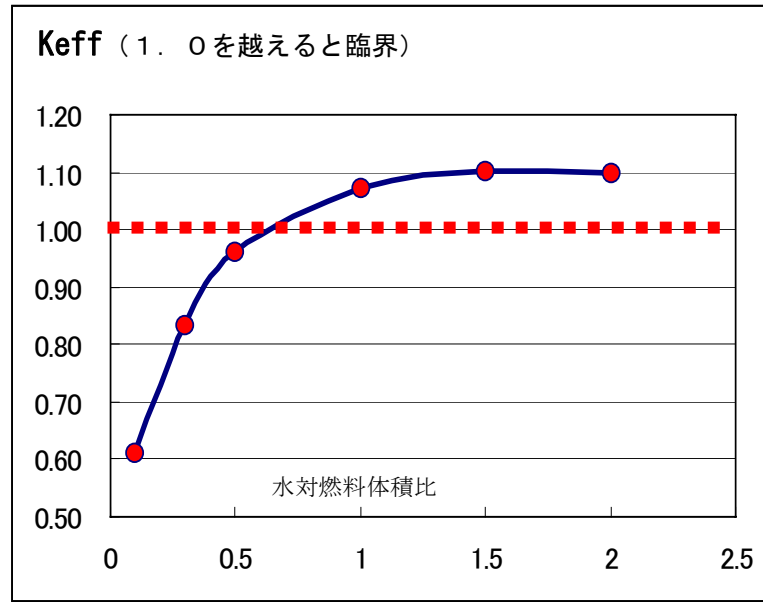
これよりも疎に充填される場合もあるが、代表的には 0.3 程度と仮定する。

軽水炉の燃料は、一般に水対燃料体積比が 2.0 付近で最も核分裂反応が起き易い状態に設計されている。そして、水の割合が減ると中性子の減速が不十分となり、核分裂反応が置きにくくなる。従って、この比率をパラメータにすれば、臨界から遠ざかる度合いが分かる。

炉心全体を上図のような体系で「濃縮度 1.25% のウラン燃料 + 水温 20 度の水」で代表させて試算してみると下記の通りとなる。なお、本計算では、前頁の図の一番右側、つまり、制御棒が抜けて水がある場合の $K_{eff}=1.1$ 、と推定しているが、この値は、事故時点の原子炉の運転状態により、多少、変動する。

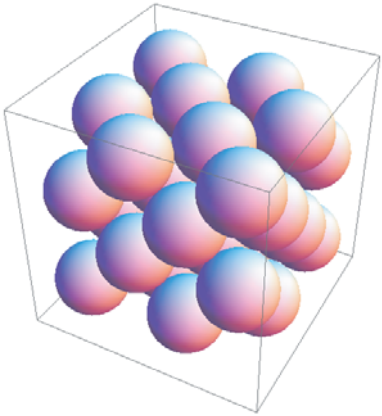

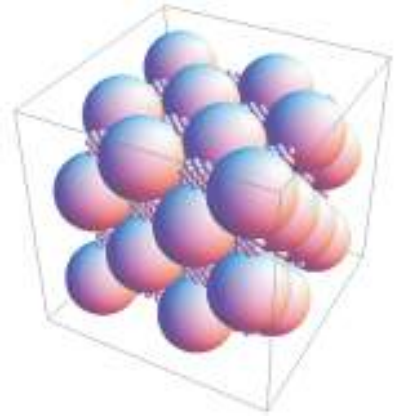
下図のように、充填密度が 0.3 程度なら、臨界 ($K_{eff}=1$) よりかなり低い値であることが分かる。どの程度なら安心できるかは一概に言えないが、 $K_{eff}=0.90$ なら臨界からかなり遠いと言えそう

である。実際には、ケース4で検討するように、燃料ペレットは、微細化している可能性が高く、この曲線より更に下側になるので、 $K_{eff}=0.95$ 程度でも良さそうである。



(友人の U 氏の計算)

以上は、2次元平面上の考察だが、燃料ペレットが（例えば直径1cmの）球形だと仮定して、立体的に充填した場合を考えてみる。

<p>同一直径の球の最充填密度は74%、つまり、水対燃料体積比は0.33である。</p> 	<p>直径約1.5cmのビー玉を100個程、円筒に詰めて、水を入れると充填密度は約54%にとどまった（外周部の無駄空間があるため）。</p> 	<p>一方、球の直径が小さい球を隙間に詰めれば、充填密度は最大93%に増加する。</p>  <p>出典：「多種球充填問題」山田修司ほか。2009。</p>
--	---	--

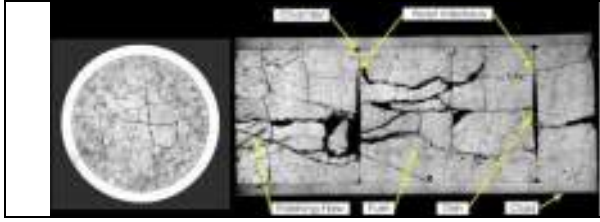
燃料が微細化すれば、右側に近くなると思われるが、代表的には水対燃料体積比0.3程度と仮定できそうである。つまり、前頁の計算で適切と思われる。

以上から、燃料が崩壊して接近した場合の方が、臨界にはなりにくいことが分かる。

ケース3（楽観的だが、ありそうなケース）：

燃料ペレットは、原子炉の中で燃焼が進むと、割れて微細化することが知られている。従って、高温の燃料ペレットが微細化して、脆化した被覆管から落下し、燃料集合体から更に压力容器底

部に落下したケースが最もありそうなケースである。

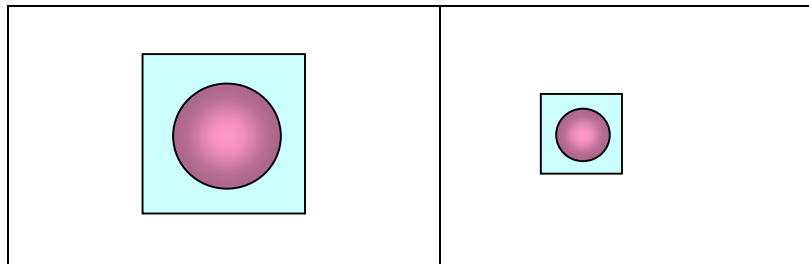


“Post Irradiation Examinations of FMDP ATR MOX Fuel”,
R.N. Morris, C.A. Baldwin, N.H. Packan, Oak Ridge National
Laboratory, 2001

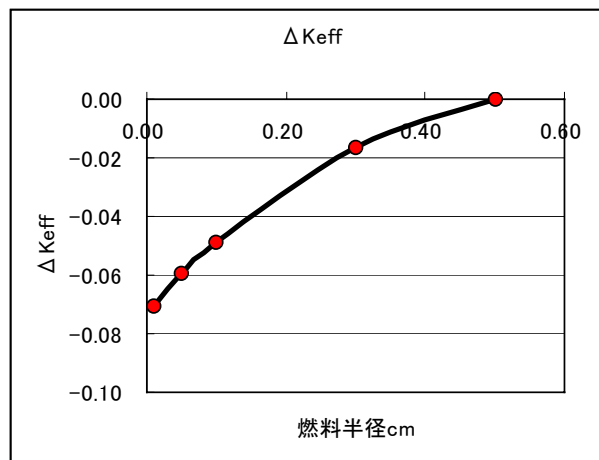
この場合は、上の「多種類の球が充填された問題」になり、ケース 2 の最後に記載したように、水対燃料体積比 0.3 程度となりそうである。つまり、燃料が崩壊して接近した場合の方が、臨界にはなりにくいことが分かる。

上のケースのように、燃料は微細化すると、表面積が増加する。そうすると中性子の吸収が増加し、核分裂反応が起きにくくなることが分かっている。

そこで、燃料を球で模擬して、その半径を標準の 0.5cm から順に小さくして、この効果を計算してみた。この時、水対燃料体積比は一定（約 2.0）とした。



想定される程度の微細化では、それほど決定的な大きさではないものの、微細化すると臨界から遠ざかる方向であることが分かる。

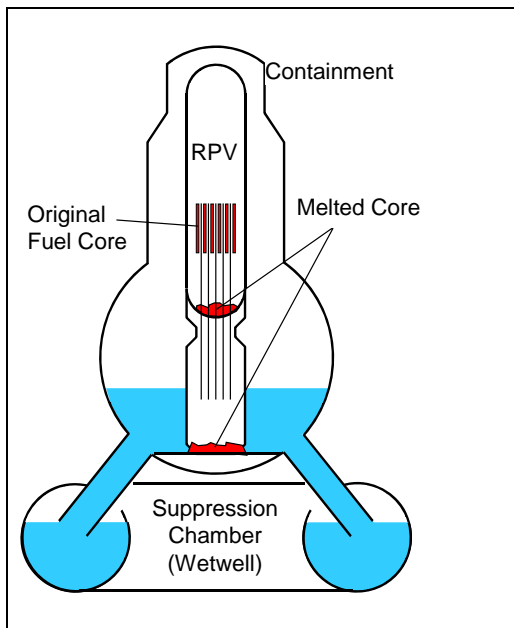


(U 氏の計算)

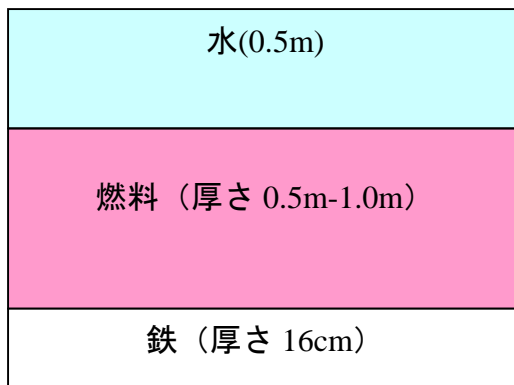
ケース 4 (悲観的ケース：燃料が大きな塊になったケース)

燃料が压力容器底部に落下し、そこで熔融して大きな塊になったと想定する。燃料の融点（2800 度）になるようなケースでは、米国スリーマイル島原発での事故のように、ウランと被覆材（ジルコニウム）が溶け合っていると考えられる。しかし、ジルコニウムは中性子を殆ど吸収しないので、臨界の起き易さの観点からは殆ど関係しない。

但し、燃料ペレットの一部に、ガドリニウムという中性子を非常に良く吸収する物質が使われていて、この存在が、臨界に影響する可能性があるが、燃料が固まっている場合は、中性子の減速が起きないため、ガドリニウムの中性子吸収効果は殆どないので、ガドリニウムの分布は臨界に影響を与えない。

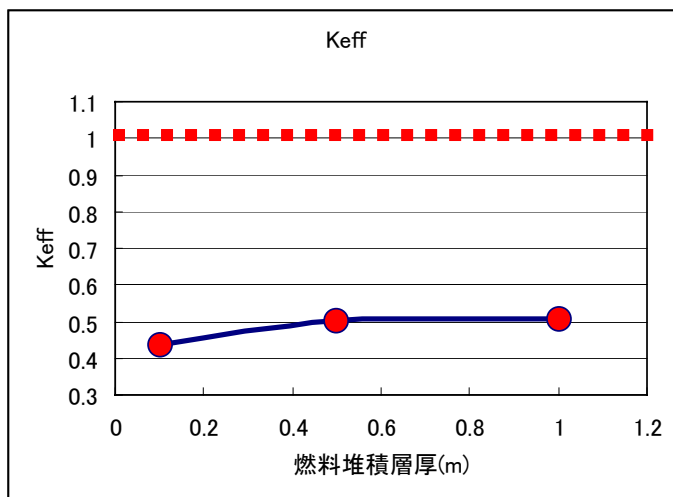


左図の圧力容器の底部に、炉心部の燃料が熔融して堆積したと仮定する。上部には水が0.5m程度、滞留していると仮定する。下部は厚さ16cmの圧力容器（鉄製）である。なお、計算上、体系の上下は空気とした。



燃料堆積部の厚さをパラメータに計算すると、下図のように、臨界 ($K_{eff}=1.0$) からは遥かに離れていることが分かる。

燃料は、水と適度に混合している場合が最も核分裂反応が起き易く、臨界になりやすい。一方、燃料が固まっている場合には、水は無く、仮にその水があっても、燃料の中に無ければ、中性子の減速は殆ど起きないので、核分裂反応は起きにくく、従って臨界にはならない。つまり、軽水炉の燃料は濃縮度が低いので、水が無ければ臨界にならない、といえる。



(U氏計算)

結論：

以上から、燃料ペレットが崩落して圧力容器底部に堆積した場合でも臨界には至らず、また、微細化して底部に堆積した場合は充填密度が上がり、臨界からは遠くなる。更に燃料が熔融して大きな塊になっていると、臨界の点からは全く問題ない。

唯一の懸念は、炉心部に燃料が残っていて、かつ制御棒が抜けてしまう場合であり、今後、注意すると共に、中性子線量などの常時計測が望ましい。