

原子炉内が崩壊熱のみによって加熱されている場合に 必要な水の投入量の推定

東北大学流体科学研究所 極限流研究部門極限熱流動研究分野

圓山・小宮研究室

2011/3/28 作成

2011/4/1 改訂

概要

原子炉停止後の燃料棒および原子炉自体の温度を見積もる上で崩壊熱の予測が重要となる。特に、図 1 および図 2 に示すように、崩壊熱は時間が経つにつれて大きく変化することが知られている。すでに、関係各位で見積もられていることは想像されるが、本レポートでは、崩壊熱の予測式を用いて、今後の燃料棒の発熱量やこれまでに発生した総熱量の計算、それに相当する蒸発水の量を見積もる。Ver2 では、河村先生から燃料棒の寿命についてコメントをいただいたので、それを基に改訂した。さらに、長期の崩壊熱の減衰についても記述した。

本レポートに付随してエクセルファイルも添付するので、伝熱に携わる研究者は各種条件の計算に使って頂ければ幸である。燃料棒の諸元については既報告レポート (HTC Rep.2.1 2011/3/30) に示してある。原発の時系列事象については、報道で報告されているとおりである。

これまでの公開データ

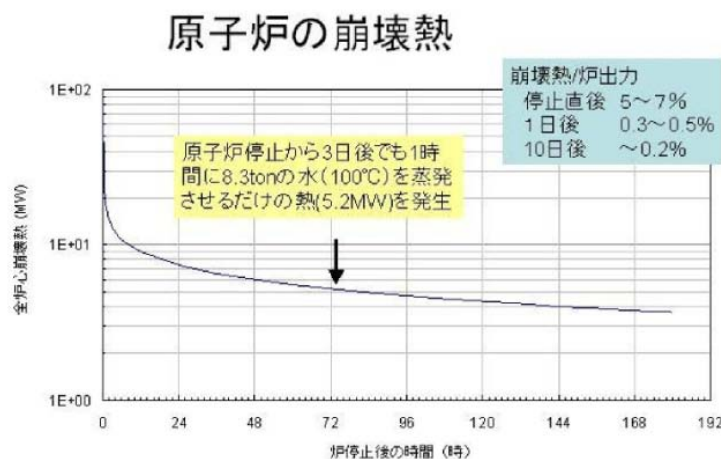


図 1 平成 23 年 3 月 18 日 田中俊一氏の講演スライド[1]より抜粋

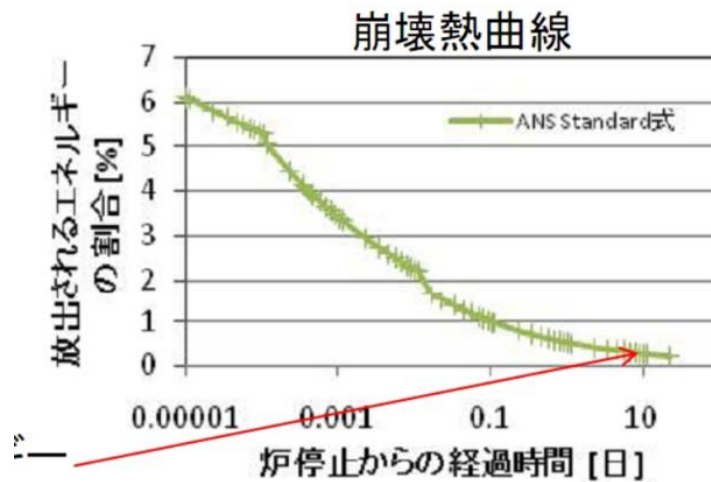


図 2 平成 23 年 3 月 18 日 東海大学原子力工学科，エネルギー工学科発表資料[2]より抜粋

崩壊熱予測式

参考文献[3]に記述されている崩壊熱の予測式を示す．

$$\frac{P(t)}{P_0} = 0.066 \left[t^{-0.2} - (t_s + t)^{-0.2} \right] \quad (1)$$

ここで、 P は崩壊熱[W], P_0 は通常運転時の原子炉熱出力[W], t は原子炉停止からの経過時間[s], t_s は燃料の使用開始からの時間[s]である．ただし、 t_s に関しては、定期検査等で核反応を止めている時間は含まないため、簡単には見積もれない．河村先生によれば、標準的には、炉心の 4 分の 1 ずつを交換して、4 サイクルで外に出すようである．Ver.1 では参考文献[3]に例として扱われていた 10 年としたが、一番長く原子炉内で使われたとした 4 年，原子炉内の平均滞在期間 2.7 年を t_s の条件とした場合を追加した。

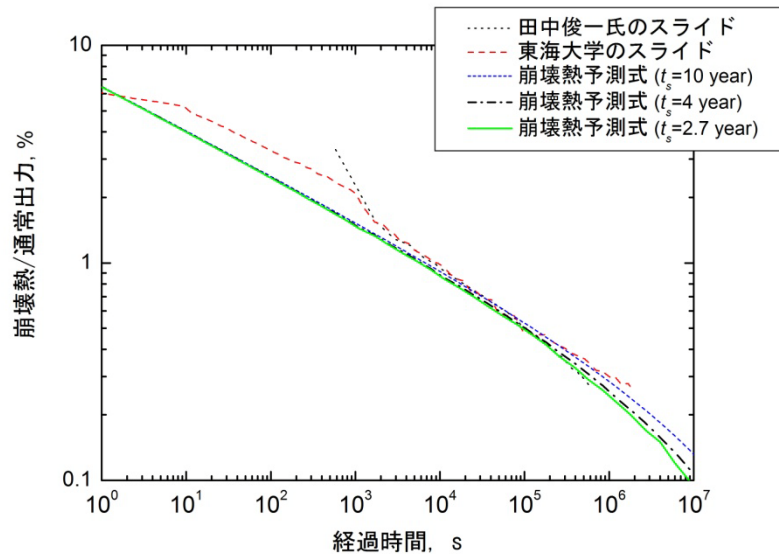


図 3 上記 2 種類のデータおよび崩壊熱予測式[3]の比較

図 3 は緒言で示した 2 種類のデータと崩壊熱予測式との比較である．式(1)が崩壊熱予測式として妥当であることがわかる．ただし、式(1)が、福島第 1 原発で妥当な式であるかどうかは、専門外のため不明である。

福島第一原発 1 号機および 2 号機の崩壊熱

式(1)に対し、福島原発 1 号機および 2 号機の崩壊熱の時間変化を計算する．計算条件として、1 号機の電気出力 460MW，2 号機の電気出力 784MW を用いる．なお、熱出力は電気出力の 3 倍とした．また、燃料使用時間 t_s は 10 年，4 年，2.7 年とした．

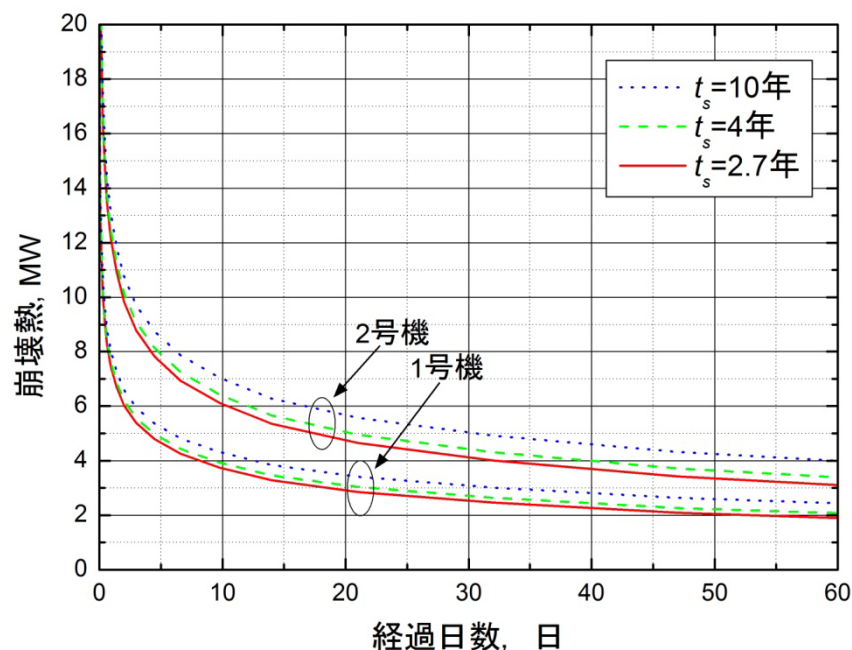


図 4 崩壊熱の経時変化

図 4 は崩壊熱の経時変化を表している．まず、燃料棒使用時間の違いにより発熱量が 2 号機で

は1MW, 1号機なら0.5MW程度異なることがわかる。崩壊熱の発熱量は燃料棒使用時間が長いほど高くなる。これは燃料棒内に蓄えられた核分裂生成物の量が多いほど発熱量が高いためである。また、4月1日時点での発熱量は1号機は2.9~3.5MW, 2号機は4.8~5.7MWであることがわかる。本データのエクセルファイルを検討することによって、燃料棒の各時間の熱流束が求められるので、沸騰や対流によって燃料棒がどのような温度履歴を持つかが推定できる。ただし、成合先生が指摘されているジルカロイの反応熱は考慮していない。

崩壊熱の変化を長期間に渡って計算した結果を図5に示す。

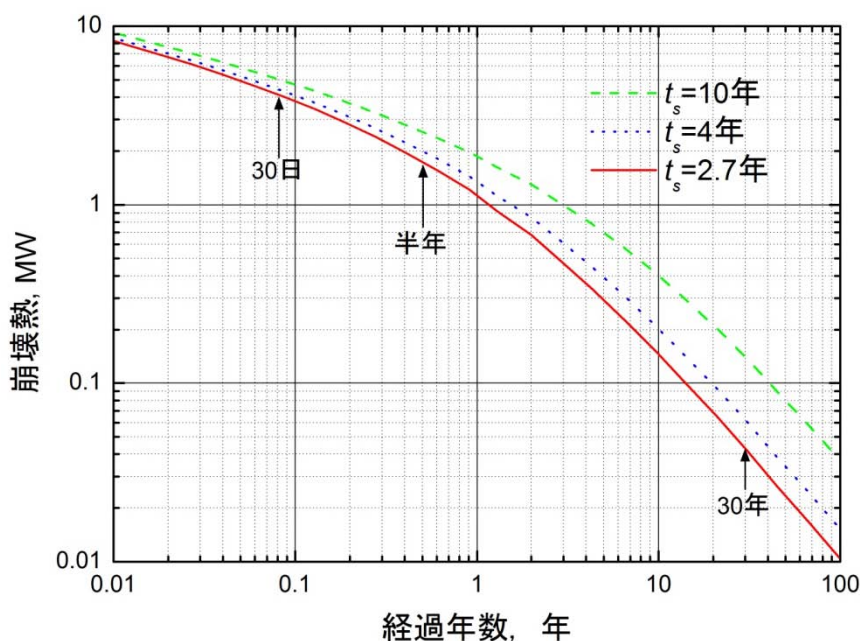


図 5 崩壊熱の経時変化(2号機, 長期間)

図5より、燃料棒使用時間2.7年の場合、発熱量が1MWを切るのが1年後、0.1MWを切るのが10年後となり長期に渡って発熱し続ける傾向が見て取れる。

次に伝熱特性を見積もる上で重要な燃料棒表面の熱流束を計算する。熱流束は単位面積当たりを通過する伝熱量で定義され、発熱する燃料棒の表面熱流束は発熱量を表面積で除すればよい。

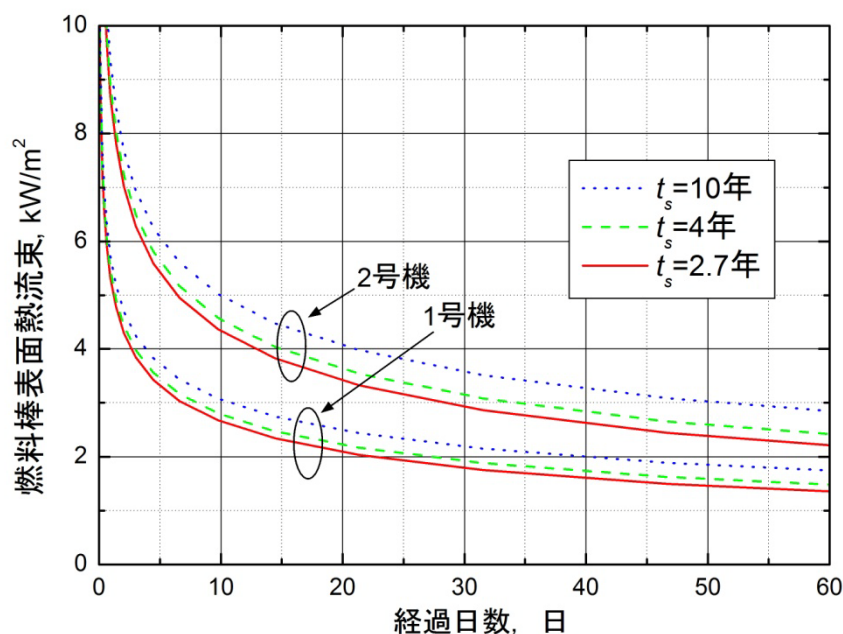


図 6 燃料棒表面熱流束の経時変化

熱流束は表面の冷却状態を予測するときに必要なパラメータとなる。

また、3 atm での水の蒸発潜熱 2.16 MJ/kg を用いて崩壊熱に相当する蒸発潜熱を有する水の質量を求める。発熱量を上記蒸発潜熱で除することにより単位時間あたりに蒸発する水量を見積もることができる。

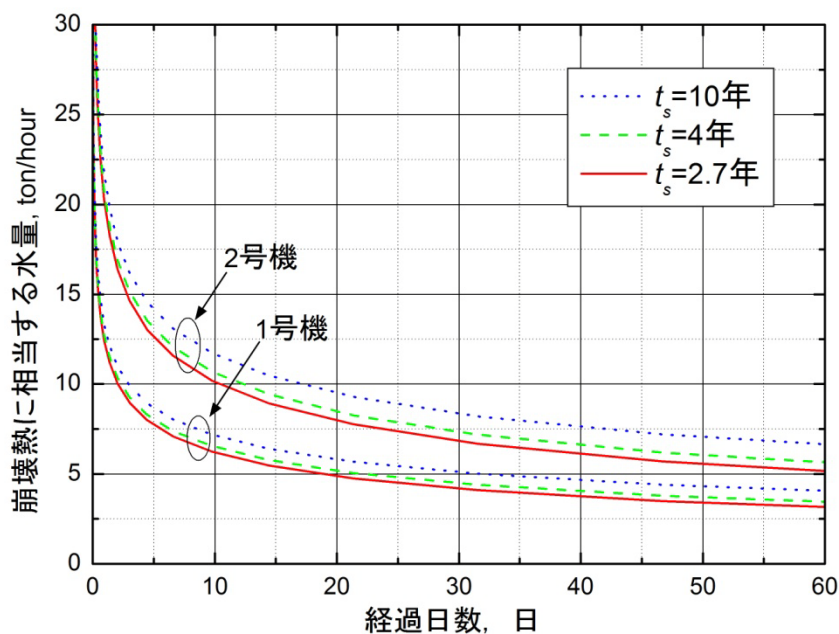


図 7 崩壊熱に相当する水量の経時変化

図 6 より、4 月 1 日時点で、当日分の崩壊熱を除去するには 1 号機に対し流量 4.8~5.7 ton/h、2 号機に対し流量 8~9.5 ton/h の水が必要となる。さらに冷却効果を得るためにはこれ以上の流量が必要になる。圧力容器の漏洩なく式(1)が適切だとした場合、本データより多量の水を投入しても水面が上がらない場合は崩壊熱以外の発熱源、つまり部分臨界が疑われる。

次に式(1)を積分することにより相崩壊熱量を見積もることができる.

$$Q(t) = \int_0^t P(\tau) d\tau = 0.0825P_0 \left[t^{0.8} + t_s^{0.8} - (t_s + t)^{0.8} \right] \quad (2)$$

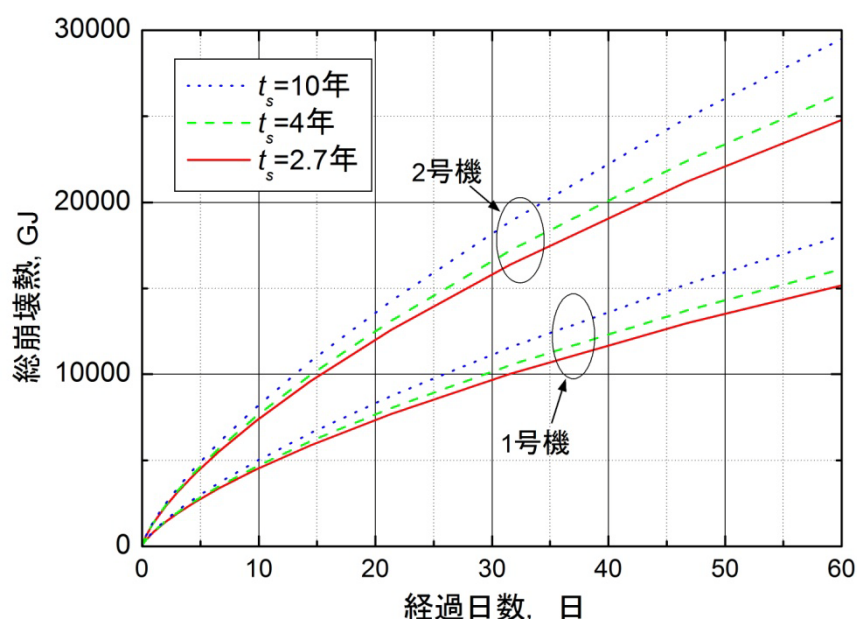


図 8 総崩壊熱の経時変化

図 7 は相崩壊熱の経時変化を表している. 図 8 より 4 月 1 日時点で, これまでに 1 号機は 7300~8000GJ, 2 号機は 12000~13600GJ 発熱したことになる.

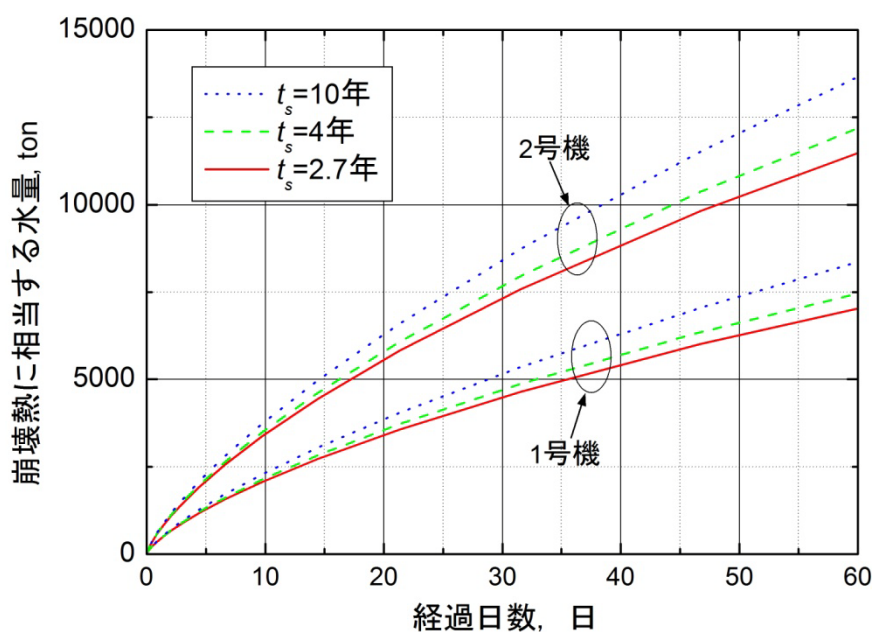


図 9 総崩壊熱に相当する水の質量

図 9 に総崩壊熱量に相当する蒸発潜熱を有する水の質量を示す. 図 9 より, これまでに 1 号機で 3300~3800 ton, 2 号機で 5500~6300 ton 以上の水を投入していた場合, 炉心に対する冷却効果は十分に表れていると考えることができる. (これまでの水投入量—漏洩水量—格納容器にたまった水) が上記の値と大きく異なる場合は部分臨界が懸念される.

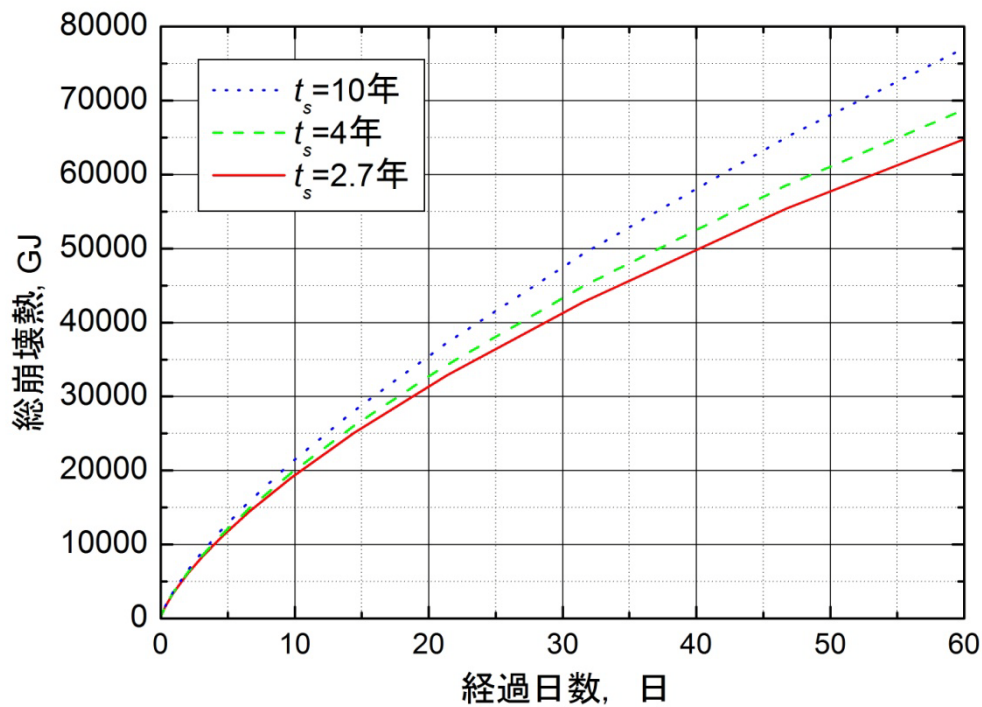


図 10 1 号機から 3 号機の崩壊熱量の合計

図 10 に福島第一原発の 1 号機から 3 号機が発生した崩壊熱の合計値を示す．これまでに 1 号機から 3 号機までの 3 つの原子炉は 30000~35000 GJ となっていることがわかる．図 9 の値に相当する水蒸気が汚染物質として炉心から排出されていることになる。水蒸気の汚染濃度が推定できれば、水注入による放射能排出が推定できるかもしれない。

参考文献

- [1] 田中俊一, “福島原発の状況について”, 平成 23 年 3 月 18 日.
- [2] 東海大学 原子力工学科 エネルギー工学科, “東京電力福島原子力発電所の事故について”, 平成 23 年 3 月 18 日.
- [3] McMaster Nuclear Reactor, McMaster University, “Decay Heat Estimates for MNR”, Technical Report 1998-03 <http://www.nuceng.ca/papers/decayhe1b.pdf>