

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

＜公表データに基づく福島第一原発の燃料データのまとめ＞

東北大学 流体科学研究所 圓山・小宮・岡島研究室

2011/03/28 作成 (Ver1)

2011/04/01 改訂 (Ver2)

2011/04/08 改訂 (Ver3)

2011/04/13 改訂 (Ver4)

2011/05/27 改訂 (Ver5)

概要

原子炉停止後の燃料棒および原子炉自体の熱解析で崩壊熱の予測が重要となる。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。各方面の研究者等が、原子炉や燃料棒保管プールの状況を把握するための参考としていただければ幸である。Ver.2 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。Ver3 ではより詳細な原子炉の運転データに基づき、パラメータを再計算し、より現実的な値を提供した。Ver4 ではVer3 で大きく見積もっていた使用済み燃料棒貯蔵プール内の崩壊熱を再検討する。Ver5 では電力中央研究所の古谷氏から指摘いただいた点を修正した。また、4号機燃料プールのパラメータを、これまでの、注水実績に基づき修正した。このレポートの値は、<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/maru/atom/>で行っている原子炉の熱解析にも使用し、妥当な結果を得ているので、実際の崩壊熱と著しく異なっていないと考えられる。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。‘基礎データ’シートの赤字の部分に日付：時間を入れると種々のパラメータが算出できる。

原子炉の基本情報

表 1 に福島第一原発の1号機から4号機に使用されている原子炉の基本情報を示す。また図 1 にBWR3マーク I 型の原子炉建屋、すなわち1号機の原子炉建屋の概要を示す。

表 1 原子炉のスペック

	電気出力[1] MW	熱出力[1] MW	原子炉型式[1]	格納容器型式[1]	燃料集合体数[1][2] 体	燃料集合体タイプ[2]
1号機	460	1380	BWR3	マーク I	400	高燃焼度 8×8 : 68 体 9×9 B 型 : 332 体
2号機	784	2381	BWR4	マーク I 改	548	9×9 B 型 : 548 体
3号機	784	2381	BWR4	マーク I 改	548	9×9 A 型 : 516 体

						MOX : 32 体
4 号機	784	2381	BWR4	マーク I 改	548	9×9 B 型 : 548 体

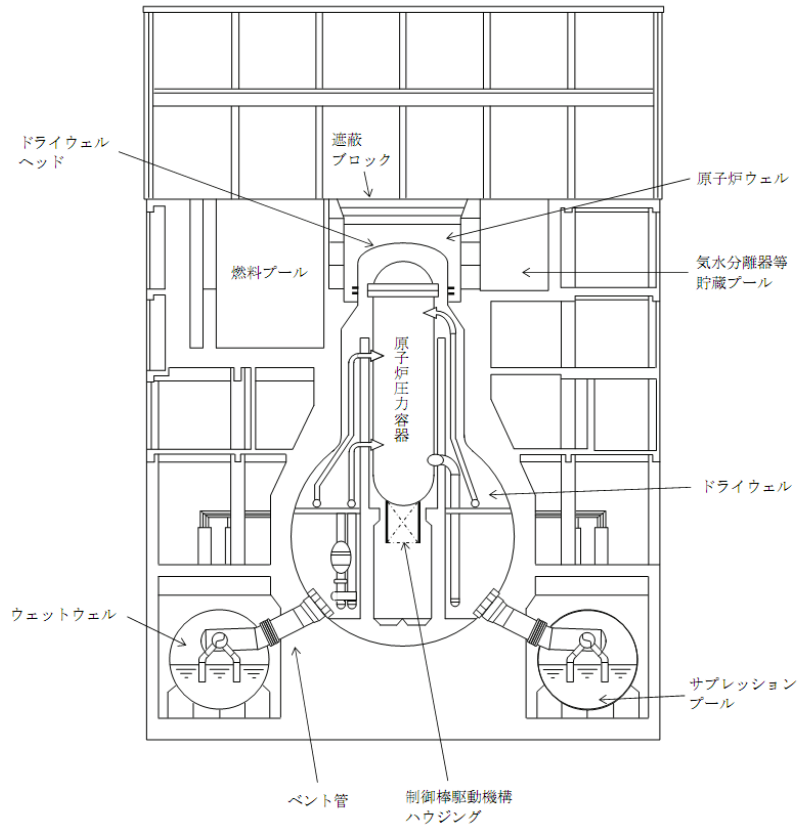


図 1 BWR3 マーク I 型原子炉建屋概要図[3]

燃料集合体および燃料棒の構造

燃料集合体の種類によって本数や発熱量が異なる。以下に 1 号機から 3 号機で使用されている燃料集合体のスペックを示す。また、図 2 に燃料集合体および燃料棒の概略図を示す。図 2 に示すように、燃料集合体の断面は正方形で一辺が 140mm である[4]。

表 2 燃料集合体のスペック[2]

	燃料棒本数	燃料棒外径 mm	燃料棒有効発熱長 m	取出平均燃焼度* GWd/t	一本当たりの 取出平均燃焼度* GWd/t (計算値)
高燃焼度 8×8	60	12.3	3.71	39.5	0.658
9×9 A 型	74	11.2	3.71	45	0.608
9×9 B 型	72	11.0	3.71	45	0.625
MOX 8×8	60	12.3	3.71	33	0.55

*燃焼度：ウラン、プルトニウム等の核物質重量当たりに累積して発生した熱量。単位重量当たりの核分裂の累積数にほぼ比例する。単位；GWd/t 又は MWd/t (http://www.jaea.go.jp/jnc/siryoku/hyouka/HY030131/sa_4_yougo.html)

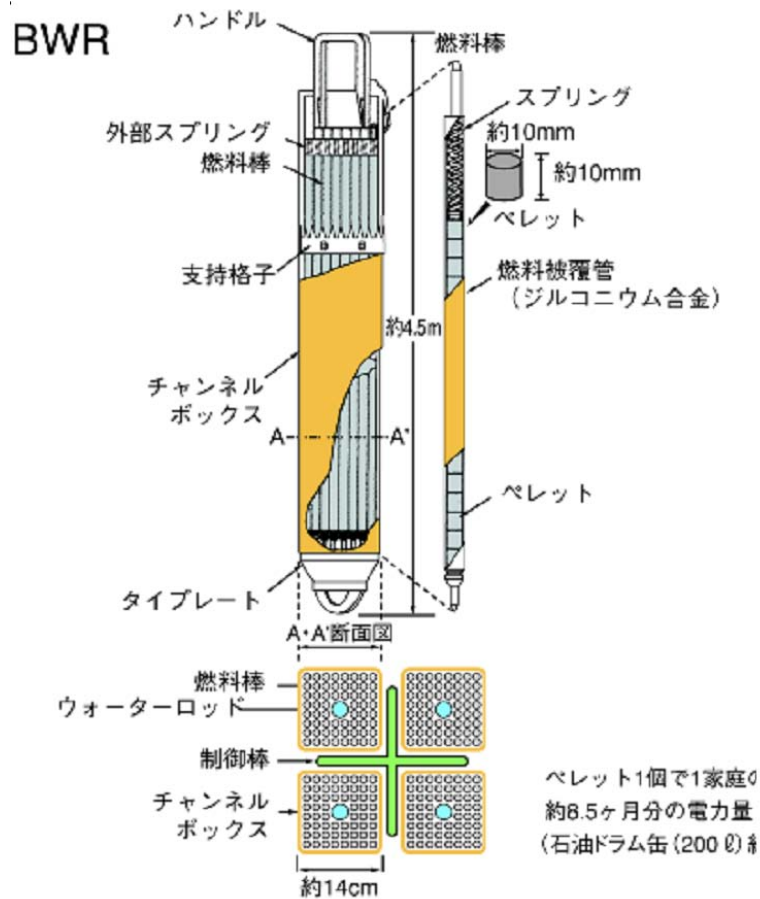


図 2 燃料集合体および燃料棒の概略図[4]

表 2 からの一本当たりの取出平均燃焼度からわかるように燃料棒一本当たりの発熱量は大きく異ならないと予測できる。この点を踏まえて、次に燃料棒一本当たりの発熱量を見積もる。

運転時における燃料棒単体の発熱量および熱流束(計算値)

表 3 燃料棒単体の発熱量(計算値)

	熱出力 MW	燃料棒総本数 本	燃料棒一本の 発熱量 MW	燃料棒 平均直径 mm	燃料棒の 表面積 m ²	熱流束 MW/m ²
1号機	1380	27984	0.0493	11.6	0.135	0.365
2号機	2381	39456	0.0603	11.0	0.128	0.471
3号機	2381	40104	0.0594	11.3	0.131	0.453
4号機	2381	39456	0.0603	11.0	0.128	0.471

燃料棒総本数は表 1 および表 2 のデータから計算することができる。燃料棒一本の発熱量は、全ての燃料棒が同じ発熱量を持つと仮定した。また、燃料棒平均直径は燃料棒の本数を考慮して求めた。

崩壊熱

参考文献[6]に記載されている崩壊熱予測式を以下に示す.

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

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 は燃料棒使用時間[s]である。 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。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。ここで、(1)定期点検時の崩壊を無視、(2)炉心の t_s 計算には炉心内の燃料体4ユニットの t_s の平均期間を用いるという2つの仮定により、参考文献[6]より燃料棒使用時間を算出した。

表 4 炉心内燃料棒の燃料棒使用時間 t_s の推定

	燃料棒使用時間 t_s , 年
1号機	1.74
2号機	1.86
3号機	1.78
4号機	2.31

表 3 および表 4, 式(1)を用いて、崩壊熱の経時変化を見積もることが可能となる。また、式(1)を積分することにより任意の時間における総発熱量を見積もることができる。総発熱量は次式で表される。

$$Q_{t_1 \rightarrow t_2} = \int_{t_1}^{t_2} P(\tau) d\tau = 0.0825 P_0 \left[t_2^{0.8} - t_1^{0.8} + (t_s + t_2)^{0.8} - (t_s + t_1)^{0.8} \right] \quad (2)$$

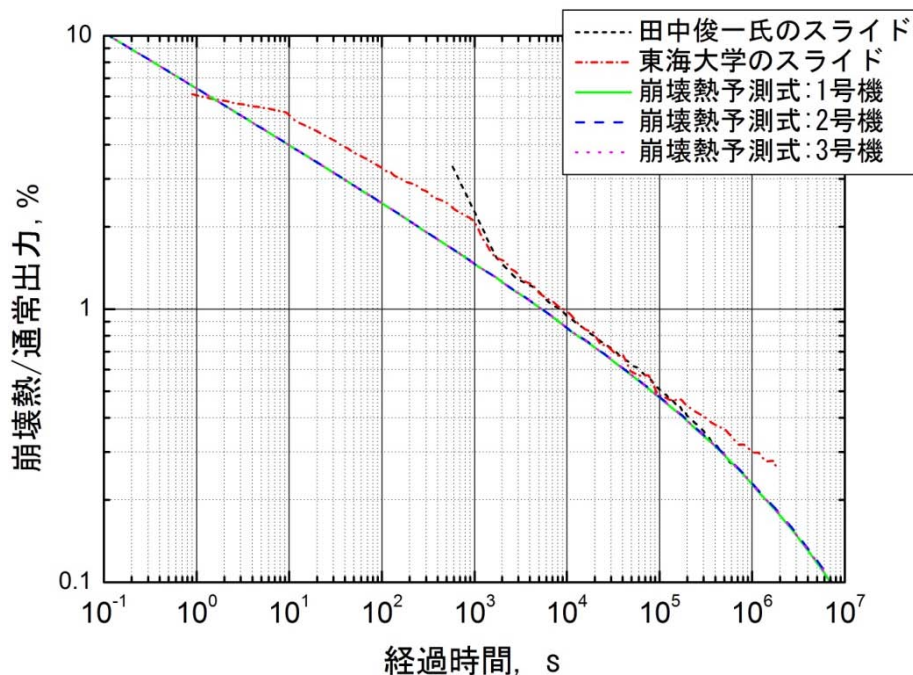


図 3 崩壊熱予測式と他の公表データとの比較[8][9]

図 3 は HTC Rep. 1.2 でも記載した公表データ[8][9]と崩壊熱予測式との比較である。崩壊熱予測式は本報での値により計算した。この結果から本報での値はこれまでのデータと傾向的に一致していることがわかる。また、燃料棒使用時間 t_s が 1 号機から 3 号機まで大きく異なることから、崩壊熱比(崩壊熱/通常出力)は 1 号機から 3 号機まででほぼ一致している。

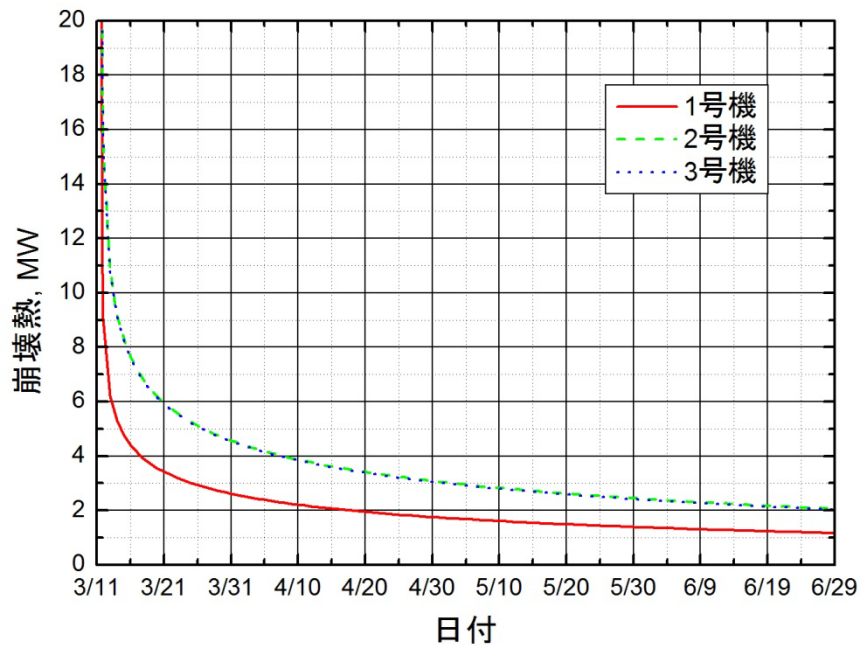


図 4 崩壊熱の経時変化

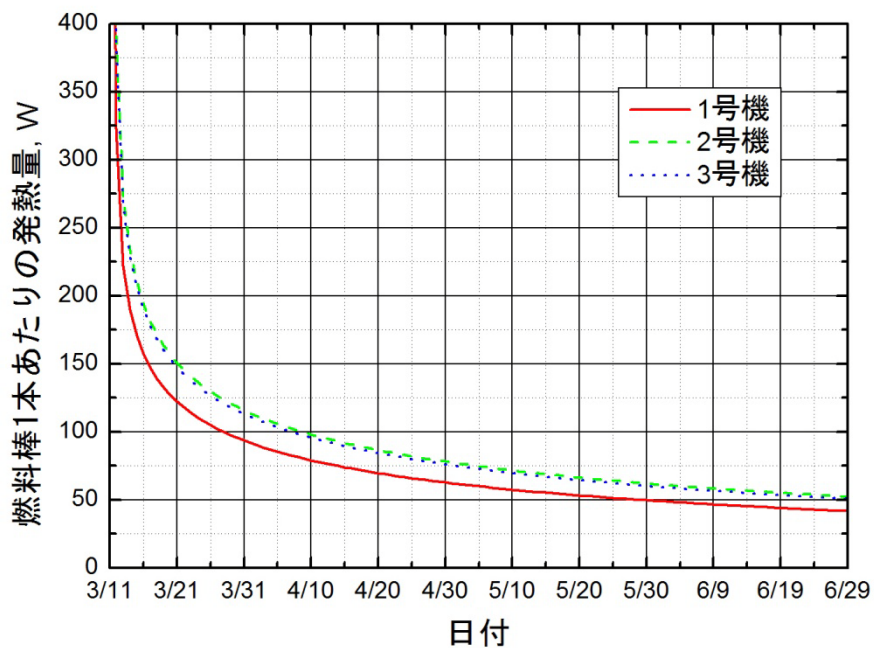


図 5 燃料棒一本あたりの発熱量の経時変化

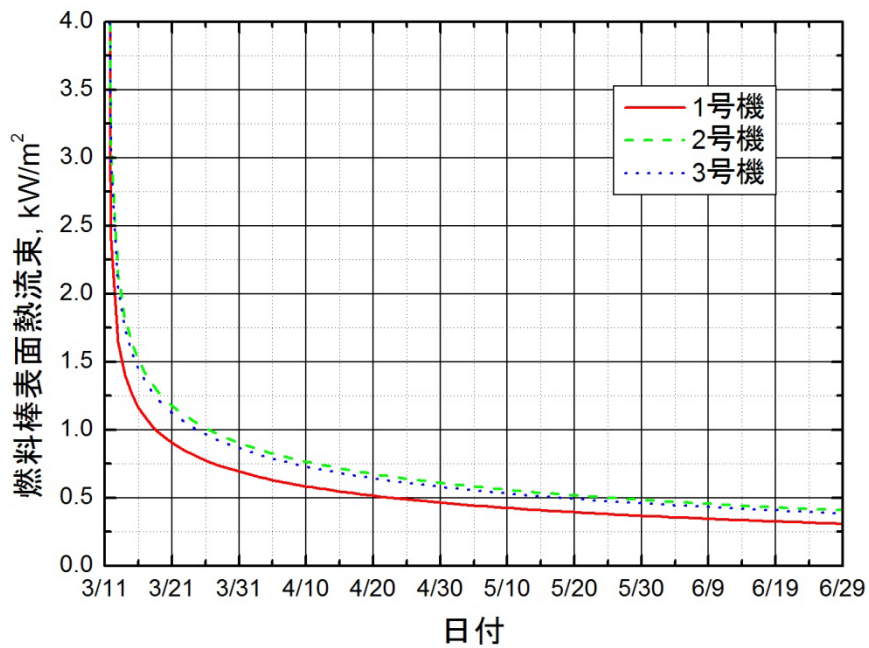


図 6 燃料棒表面の熱流束の経時変化

図 4, 図 5, 図 6 はそれぞれ原子炉の発熱量, 燃料棒一本の発熱量, 燃料棒表面熱流束の経時変化を表している. 1号機から3号機までの違いは主に通常運転時の発熱量の違いに由来するものである. 河村先生の指摘によると、燃料棒の縦方向の発熱分布にはばらつきがあり、その差異は平均値に比べて1.4倍程度になることがあることに注意する。

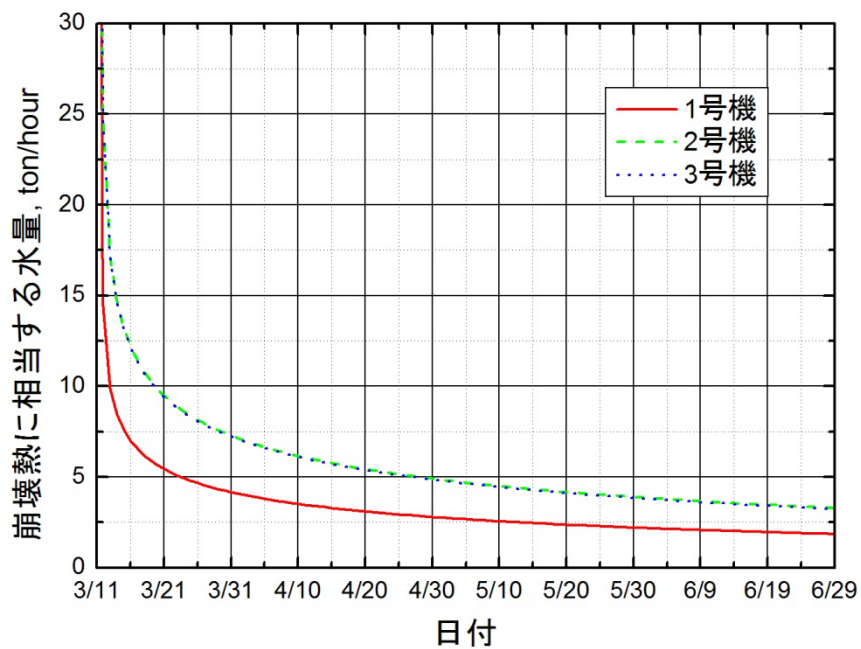


図 7 崩壊熱に相当する水量の経時変化

図 7 は崩壊熱に相当する水量を表している。原子炉内を 1atm の気液平衡状態とみなし、発熱量を水の蒸発潜熱 2.16MJ/kg で除したものである。原子炉の温度を維持するための最低限必要な水の流量とみなすことができる。2号機と3号機は発熱量がほぼ同じであるため、注入水量も同量でよいことがわかる。

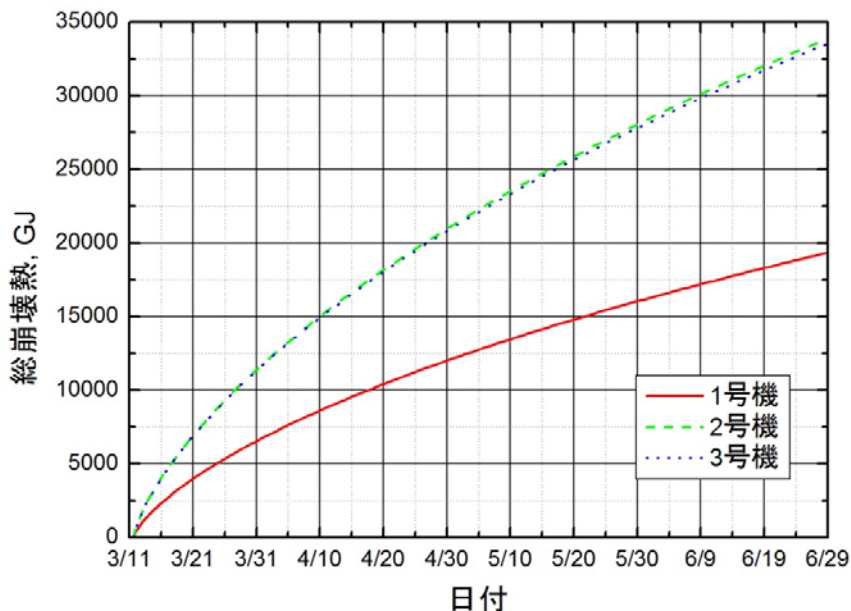


図 8 原子炉停止からの総崩壊熱量

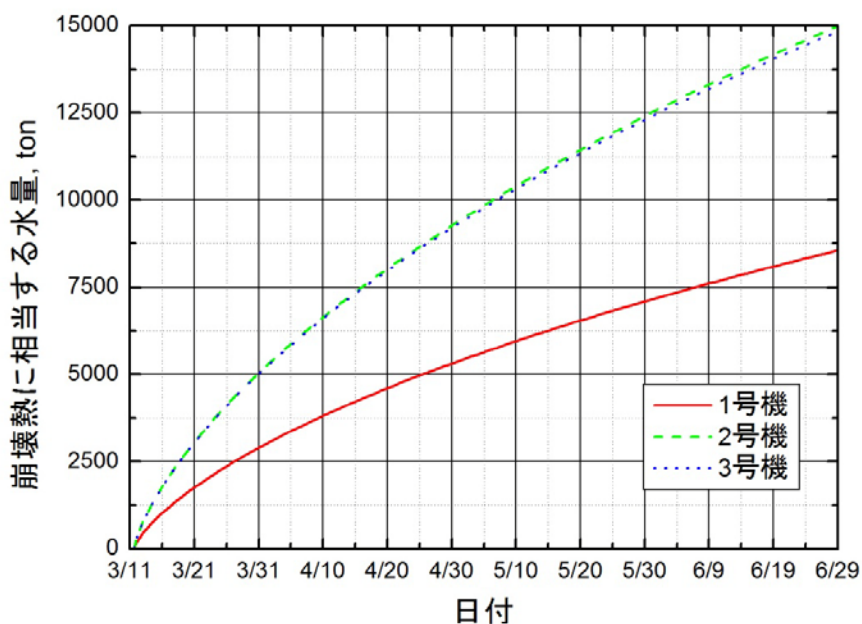


図 9 原子炉停止からの総崩壊熱量に相当する水量

図 8 および図 9 は式(2)を用いて原子炉停止からの発熱量および温度維持に必要な水量の積算値を表している。原子炉停止から 30 日後には、原子炉の発熱量は 1 号機が 8600GJ, 2・3 号機が 15000GJ となっている。また、その熱量に相当する水の量は 1 号機が 4000ton, 2・3 号機が 7000ton となっている。

使用済み燃料貯蔵プール

使用済み燃料貯蔵プール内には原子炉で 4 サイクル使用した燃料棒が貯蔵されており，すなわち前述の燃料棒使用時間が原子炉内と比較し長くなる．そこで，参考文献[6]を再度利用し，使用済み燃料貯蔵プール内に保管されている燃料棒の燃料棒使用時間 t_s を見積もった．また参考文献[7]に記されている使用済み燃料貯蔵プール内の燃料集合体数も併記する．

表 5 使用済み燃料貯蔵プール内燃料棒の燃料棒使用時間 t_s と本数(2010 年度 12 月末時点)

	燃料棒使用時間 t_s , 年	燃料集合体数[7]
1 号機	3.84	292
2 号機	3.78	587
3 号機	3.86	514
4 号機	3.83	783

使用済み燃料棒貯蔵プール内の燃料棒の崩壊熱を計算するうえで，各燃料棒の核反応が停止した日付が必要になるが，それを見積もるのは困難である．Ver3 では参考文献[7]にあるように貯蔵量が年を通じて変化していないことから，昨年度初日(2010/4/1)を核反応の停止日と仮定した．しかしながら，この仮定では崩壊熱を大きく見積もりすぎている可能性が HTC Rep.1.3-b で示された．そこで核反応の停止日を 2008 年 4 月 1 日として仮定した．また，現在問題となっている 4 号機の使用済み燃料棒貯蔵プールに関しては表 5 に示した貯蔵量の他に 2010 年 11 月 29 日まで原子炉内で使用していた燃料棒が現在保管されている．そのため，実際に 4 号機の使用済み燃料棒貯蔵プール内にある燃料集合体数は表 5 に示した 783 本と表 1 に示した 548 本との合計 1331 本になる．そこで，4 号機の使用済み燃料棒貯蔵プール内の発熱量は 2010 年 11 月 30 日より前のものと 2010 年 11 月 30 日以後のものの発熱量の和になる．また，HTC Rep.13.2 において 4 号機の使用済み燃料棒貯蔵プール内への注水量の実測値を用いて燃料棒使用時間を 2010 年 11 月 30 日以前の燃料棒で 1.7 年、以後のもので 0.7 年へと修正している．

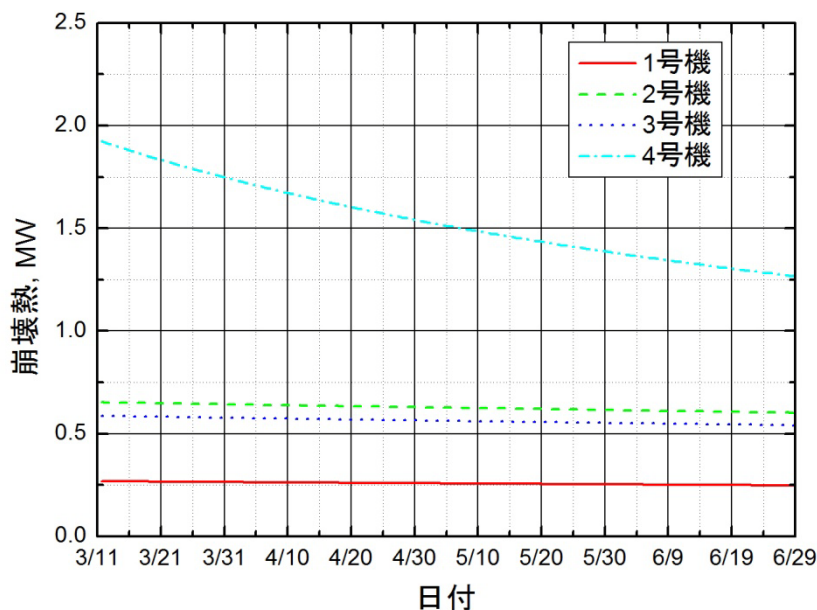


図 10 使用済み燃料棒貯蔵プール内の燃料棒の発熱量の変化

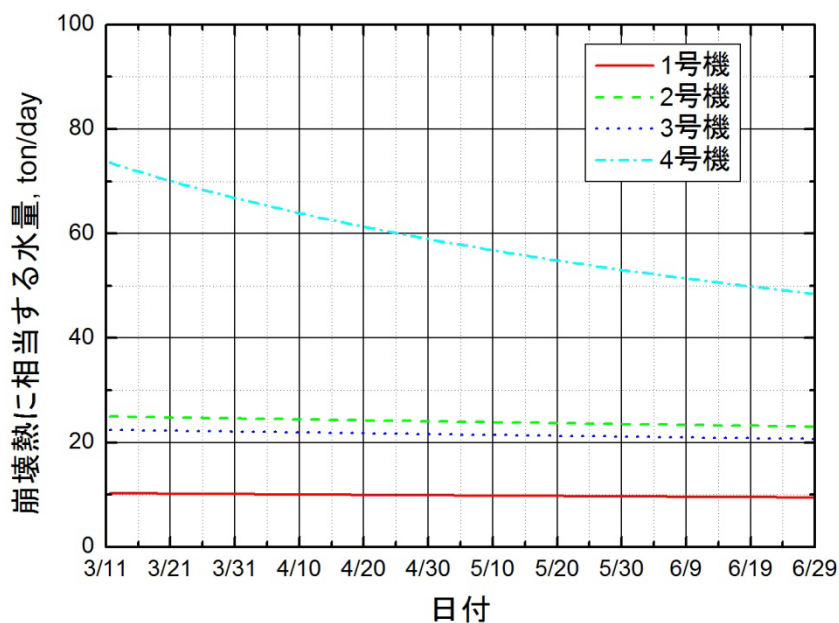


図 11 使用済み燃料棒貯蔵プール内の燃料棒の発熱量に相当する水量

図 10 は使用済み燃料棒貯蔵プール内の燃料棒の発熱量の変化を表している。横軸は原子炉停止（3月11日）からの経過日数である。4号機に着目すると、貯蔵本数も多いため、発熱量自体が大きい。1号機は1年前から貯蔵されていることと、本数が少ないことから発熱量が小さくなっている。図 11 は発熱量に対応する水量となっている。

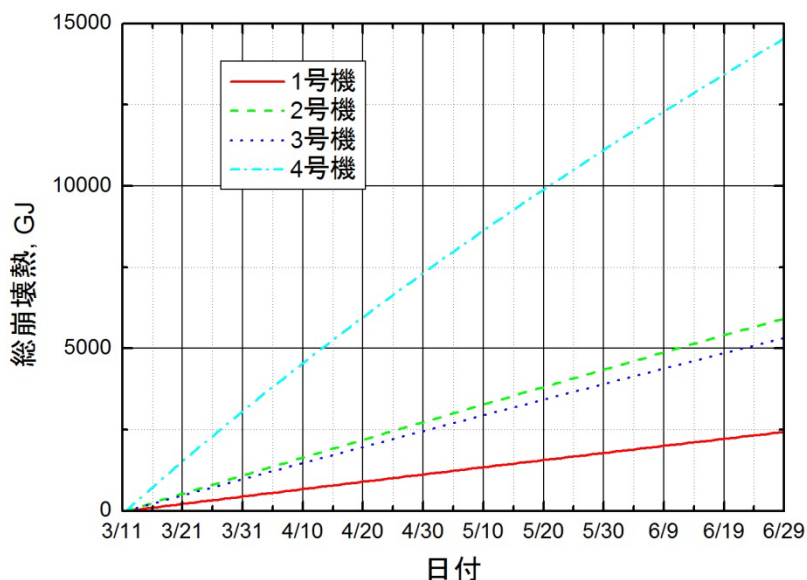


図 12 使用済み燃料棒貯蔵プール内燃料棒の総発熱量

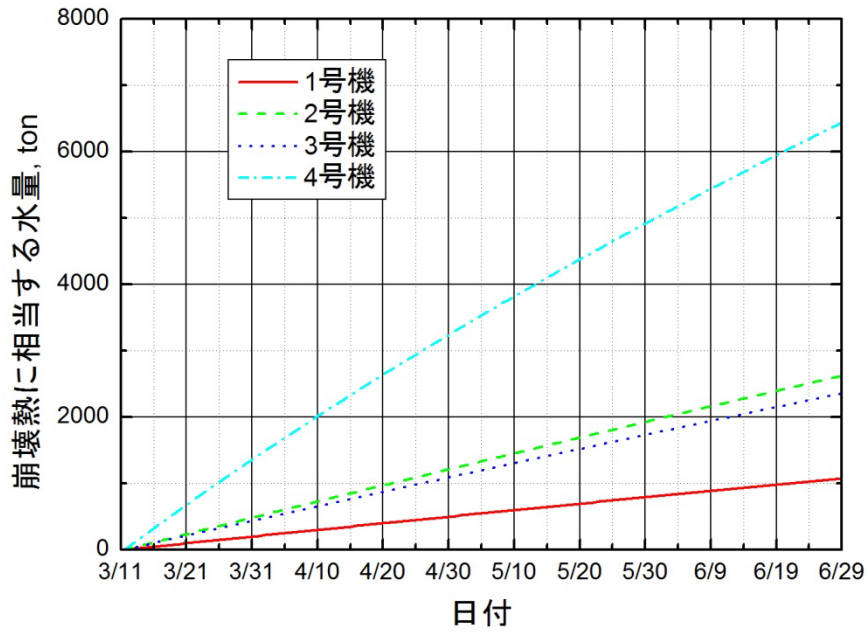


図 13 使用済み燃料棒貯蔵プール内燃料棒の総発熱量に相当する水量

図 12 は総発熱量，図 13 はそれに相当する水量を表している．増加傾向が直線であるのは，崩壊熱の放出から時間が経っており，発熱量がほぼ一定であることに起因している．

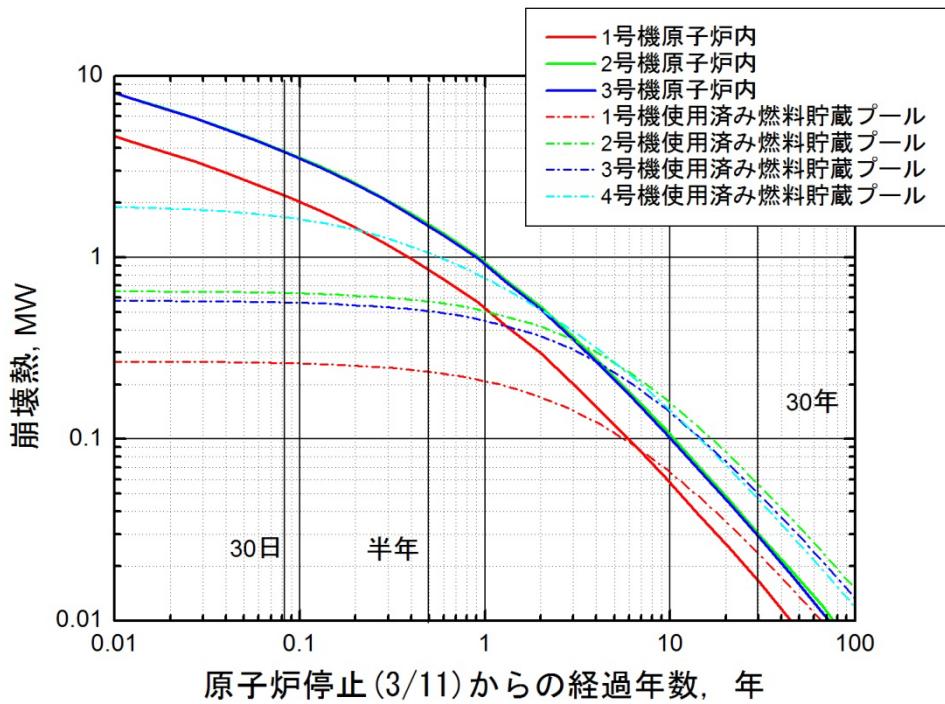


図 14 長期間にわたる崩壊熱の経時変化

図 14 に長期間にわたる崩壊熱の経時変化を示す。ただし、式(1)の有効範囲は、1 年程度（河村先生コメント）であり、この図は長期の崩壊熱推定に有効であるという保証はないことに注意されたい。

情報源

- [1] 東京電力，“原子力発電所設備データ”，<http://www.tepco.co.jp/nu/programs/viewf1-j.html>
- [2] 東京電力，“原子炉にどれだけウラン燃料は入っているの？”，東京電力原子力データライブラリ，<http://www.tepco.co.jp/nu/torikumi/nuclearlibrary/atomfuel/atomfuel01-j.html>.
- [3] 原子力安全基盤機構，“平成 21 年度 地震レベル 2PSA の解析（BWR）”，<http://www.jnes.go.jp/content/000017303.pdf>, p. 2-19.
- [4] 日本原子力学会，“福島第一原子力発電所の放射性物質の閉じ込めと炉内の燃料構造について”
http://www.aesj.or.jp/information/fnpp201103/com_nenryo-kozo20110324.pdf
- [5] McMaster Nuclear Reactor, McMaster University, “Decay Heat Estimates for MNR”, Technical Report 1998-03 <http://www.nuceng.ca/papers/decayhe1b.pdf>
- [6] 東京電力，“定期検査実績”，http://www.tepco.co.jp/nu/f1-np/data_lib/pdfdata/bk1011-j.pdf.
- [7] 東京電力，“使用済燃料の貯蔵状況”，http://www.tepco.co.jp/nu/f1-np/data_lib/pdfdata/bk1002-j.pdf.
- [8] “福島原発事故の田中俊一氏（3月18日）講演について”，<http://blog.goo.ne.jp/ngc2497/e/f4e0db9c64c5ae9d9a7a1c28e28fa9e5>
- [9] 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.