

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)

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。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。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。このデータでも、実際の崩壊熱より若干大きめに見積もっている可能性があることに注意して頂きたい。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。

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 |

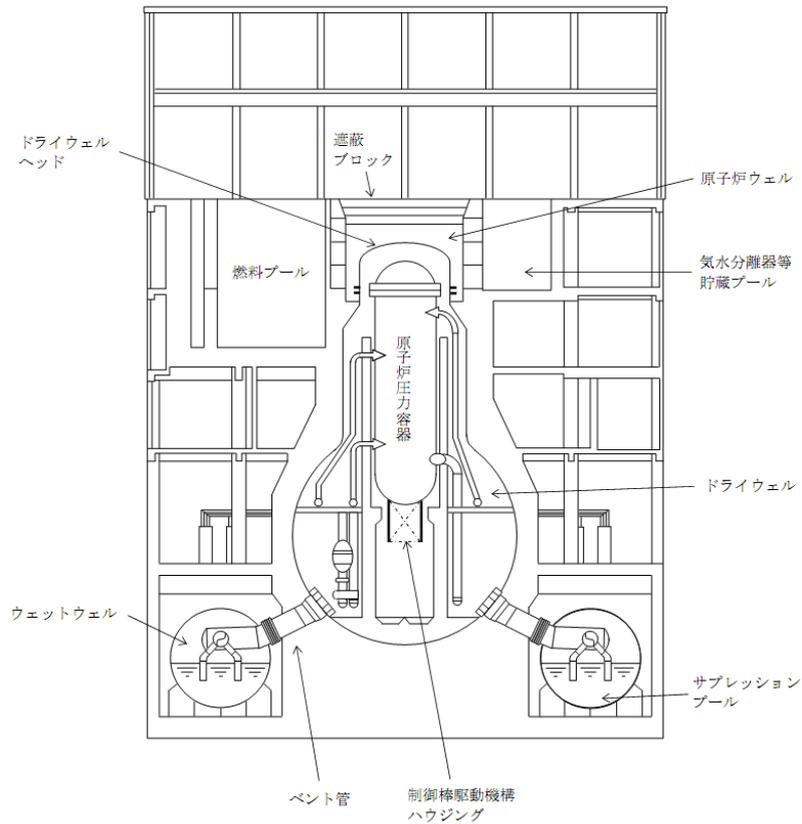


図 1 BWR3 マーク I 型原子炉建屋概要図[3]

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 | 燃料長さ 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 | 4 | 39.5 | 0.658 |
| 9×9 A 型 | 74 | 11.2 | 4 | 45 | 0.608 |
| 9×9 B 型 | 72 | 11.0 | 4 | 45 | 0.625 |
| MOX 8×8 | 60 | 12.3 | 4 | 33 | 0.55 |

*燃焼度：ウラン、プルトニウム等の核物質重量当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/siryu/hyouka/HY030131/sa_4_yougo.html)

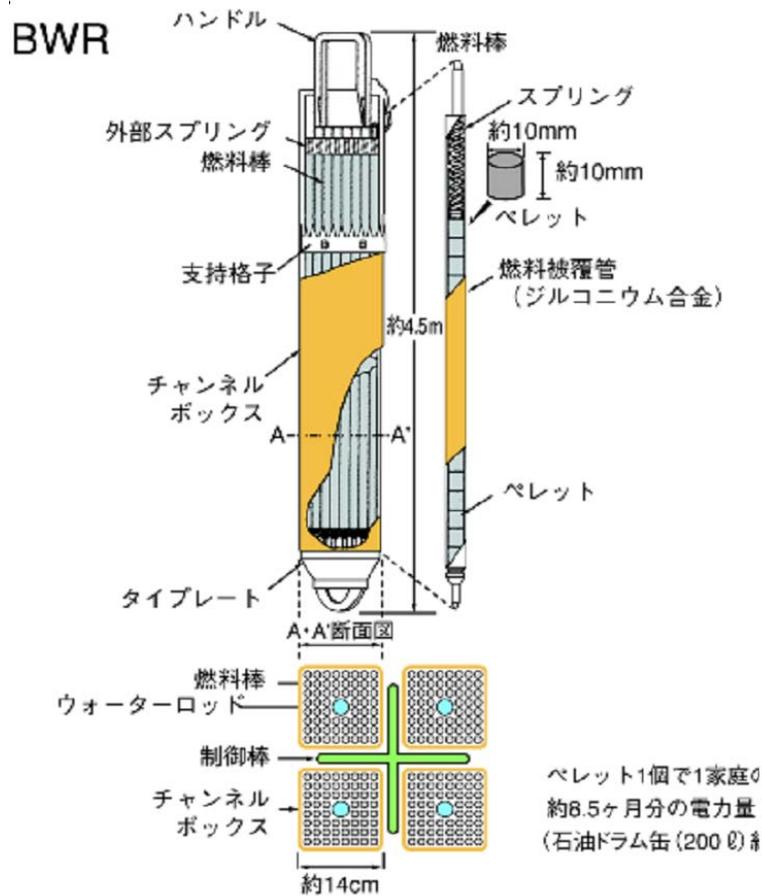


図 2 燃料集合体および燃料棒の概略図[4]

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 | 0.146 | 0.338 |
| 2号機 | 2381 | 39456 | 0.0603 | 11.0 | 0.138 | 0.437 |
| 3号機 | 2381 | 40104 | 0.0594 | 11.3 | 0.142 | 0.418 |
| 4号機 | 2381 | 39456 | 0.0603 | 11.0 | 0.138 | 0.437 |

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。

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

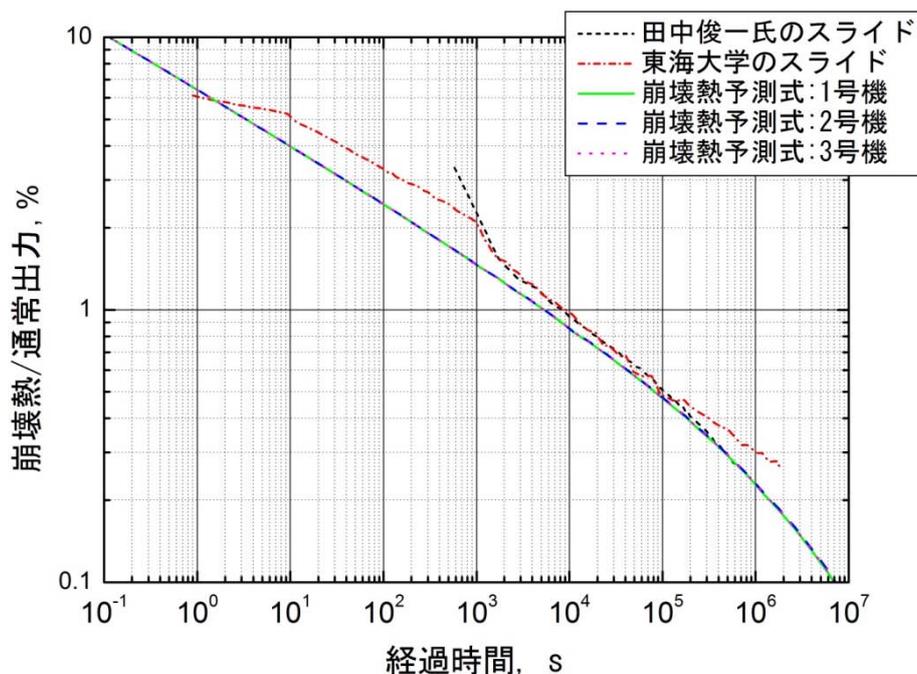


図 3 崩壊熱予測式と他の公表データとの比較[8][9]

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。

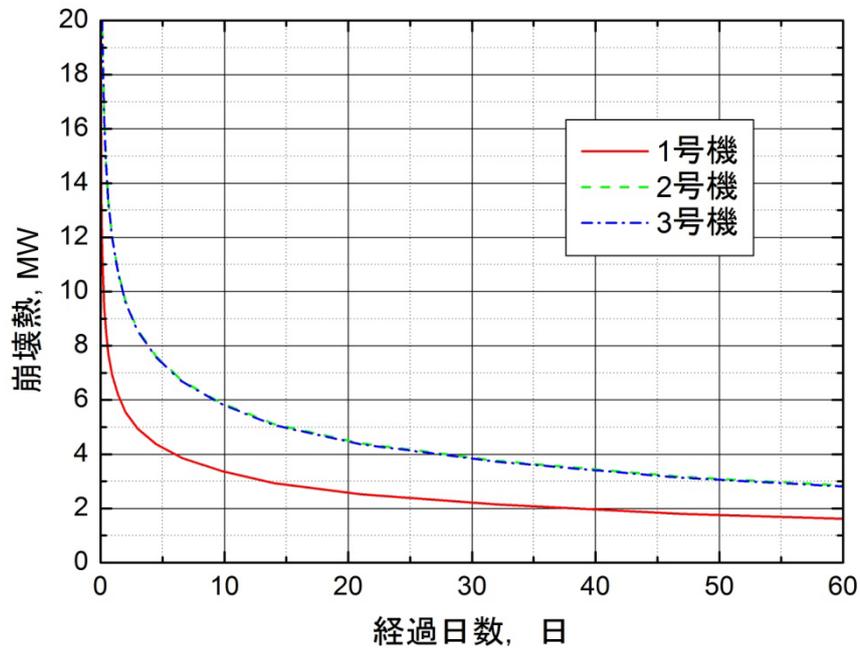


図 4 崩壊熱の経時変化

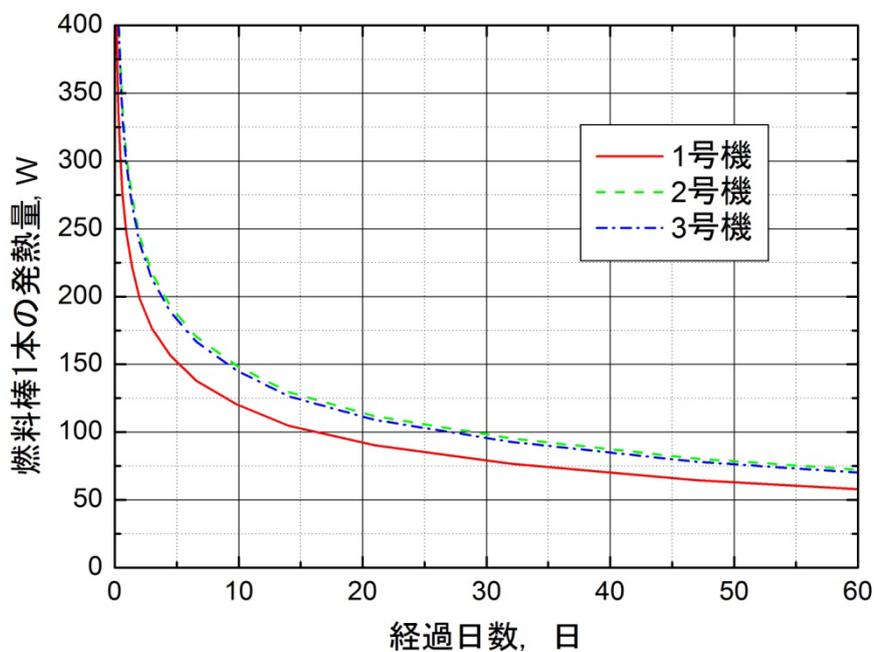


図 5 燃料棒一本当たりの発熱量の経時変化

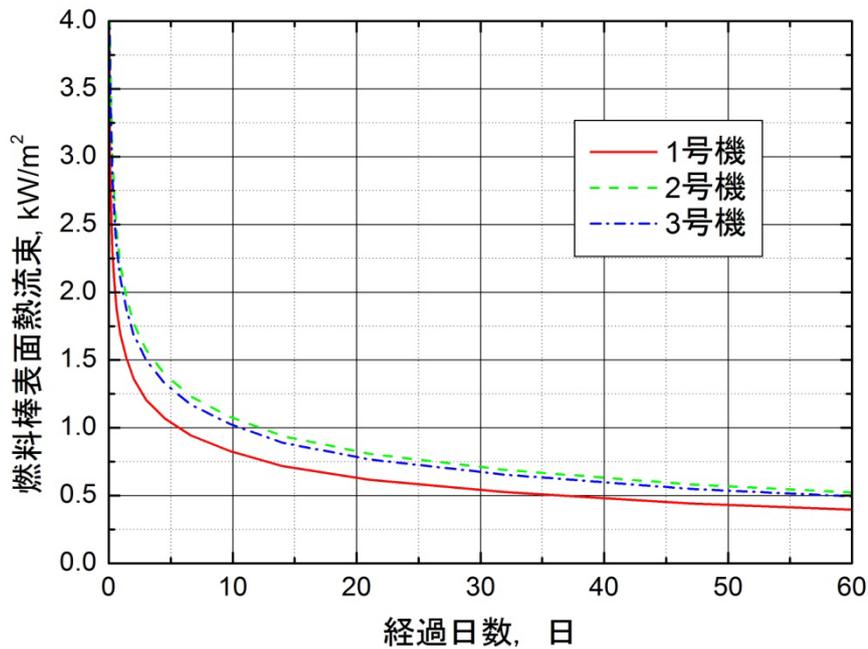


図 6 燃料棒表面の熱流束の経時変化

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. 原子炉停止から30日後には, 原子炉の発熱量は1号機が2.2MW, 2・3号機が3.9MWとなっている. 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.

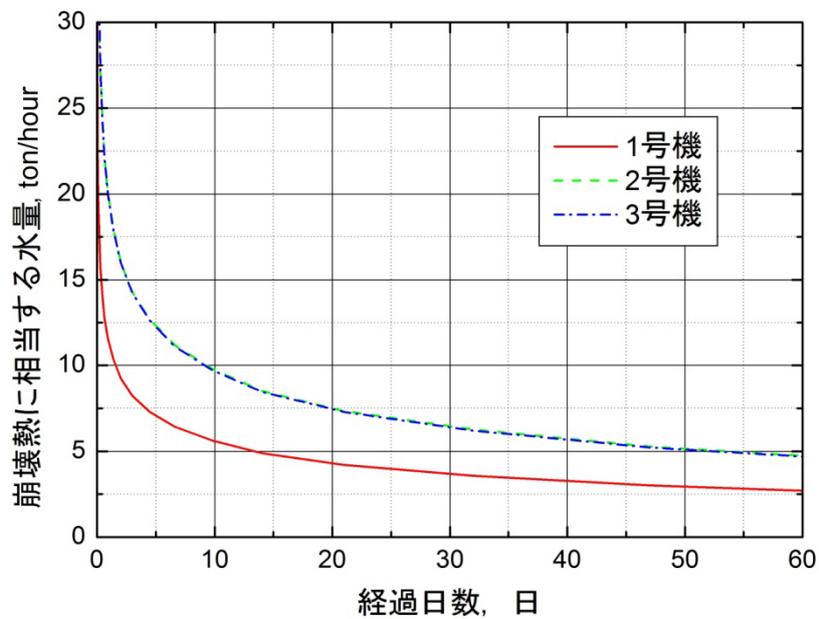


図 7 崩壊熱に相当する水量の経時変化

図 7 は崩壊熱に相当する水量を表している。原子炉内を 3atm 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。原子炉停止から 30 日後の温度維持のための注水量は 1号機が毎時 3.6ton, 2・3号機が毎時 6.4ton となっている。

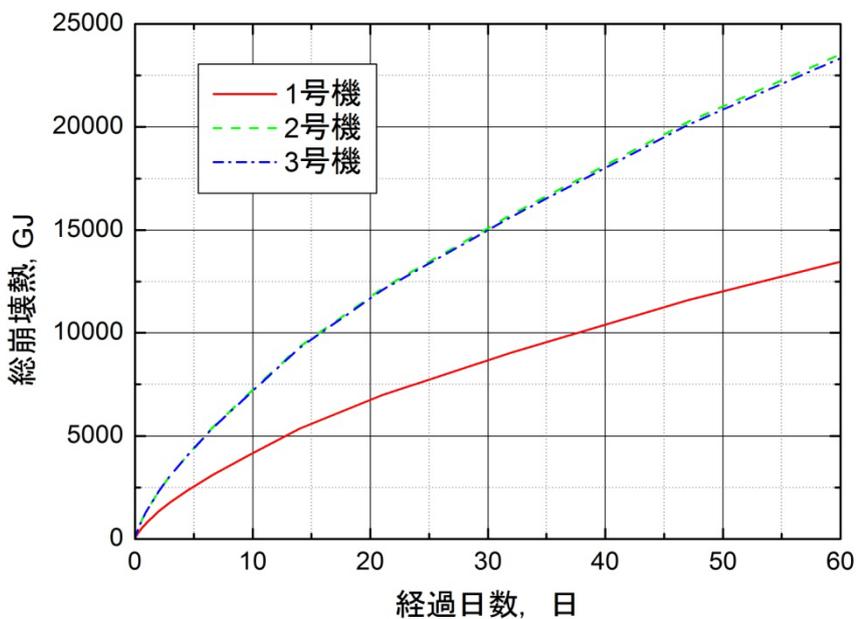


図 8 原子炉停止からの総崩壊熱量

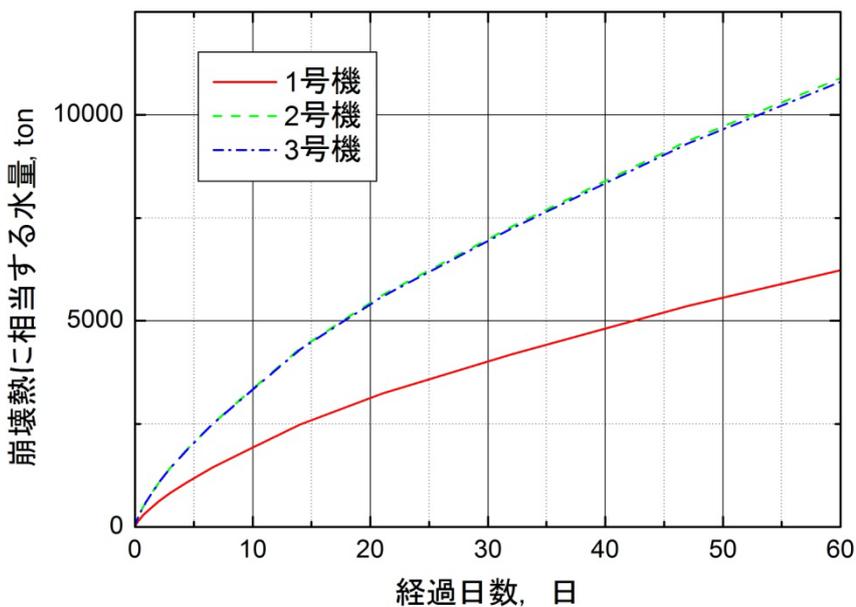


図 9 原子炉停止からの総崩壊熱量に相当する水量

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。図 10 にこの内訳と総和を示す。この値は、実際のものより若干大きめに見積もっている可能性がある。また、燃料棒の軸方向発熱分布が一様でないことも注意する。

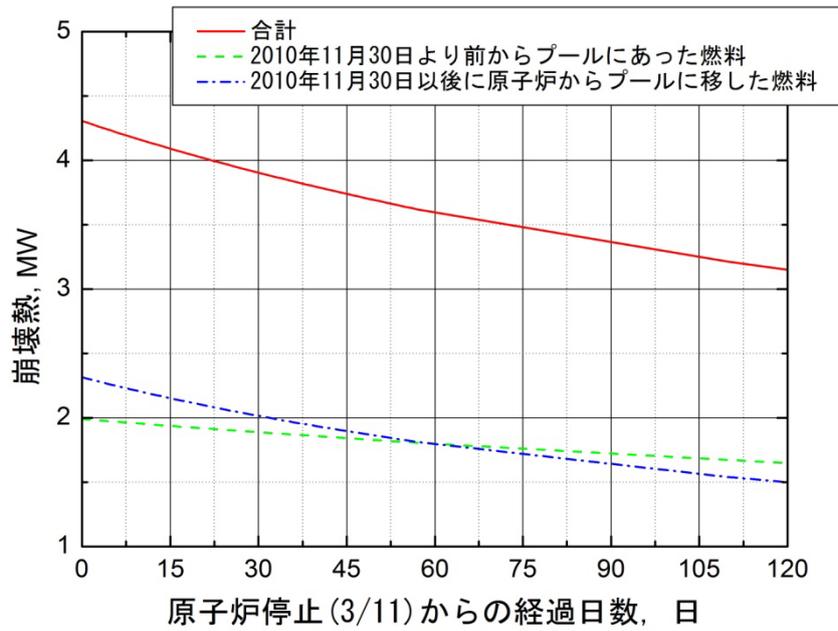


図 10 4号機の使用済み燃料棒貯蔵プール内の発熱量の内訳と総和

図 10 に示すように震災直後は 11 月 30 日以後に原子炉からプールに移された燃料の発熱量が以前から貯蔵されていた燃料の発熱量よりも大きいですが、2 年後を境に逆転している。これは燃料棒使用時間 t_s の違いによる影響であり、貯蔵されていた燃料は 4 サイクル使用済みであるため、使用中の燃料よりも長期にわたり発熱する。

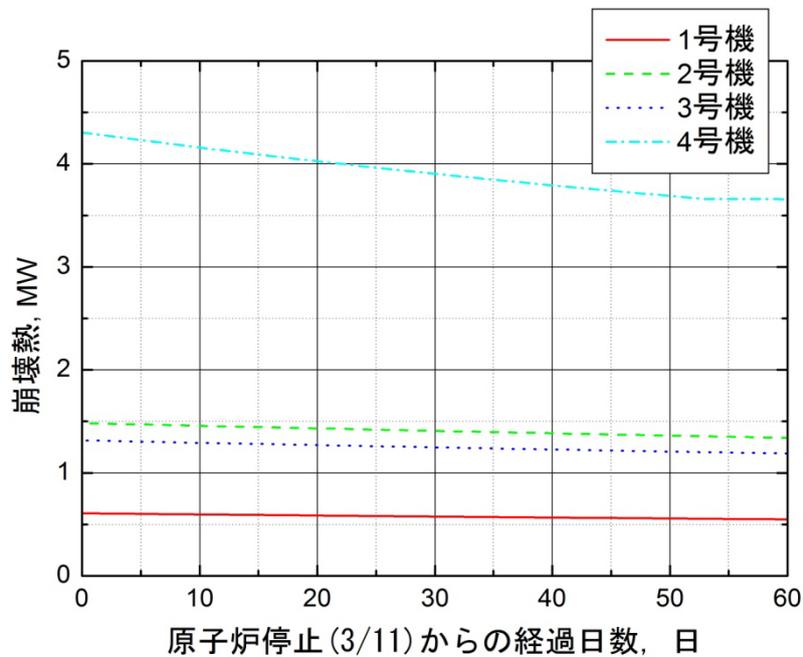


図 11 使用済み燃料棒貯蔵プール内の燃料棒の発熱量の変化

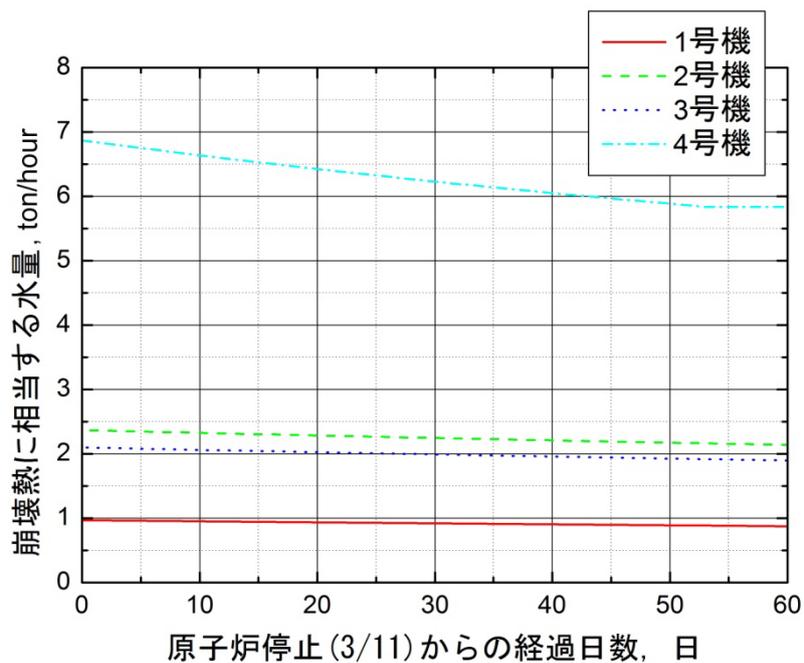


図 12 使用済み燃料棒貯蔵プール内の燃料棒の発熱量に相当する水量

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。冷却機能が回復しないうちは崩壊熱相当の水が蒸発するため、補充する必要がある。4月11日（1か月後）の温度維持のための注水量は1号機が毎時0.4ton、2号機が毎時1.0ton、3号機が毎時0.9ton、4号機が4.6tonとなっている。このため、4号機使用済み燃料棒貯蔵プールへの注水必要量は1号機の原子炉内への必要量を超えている。

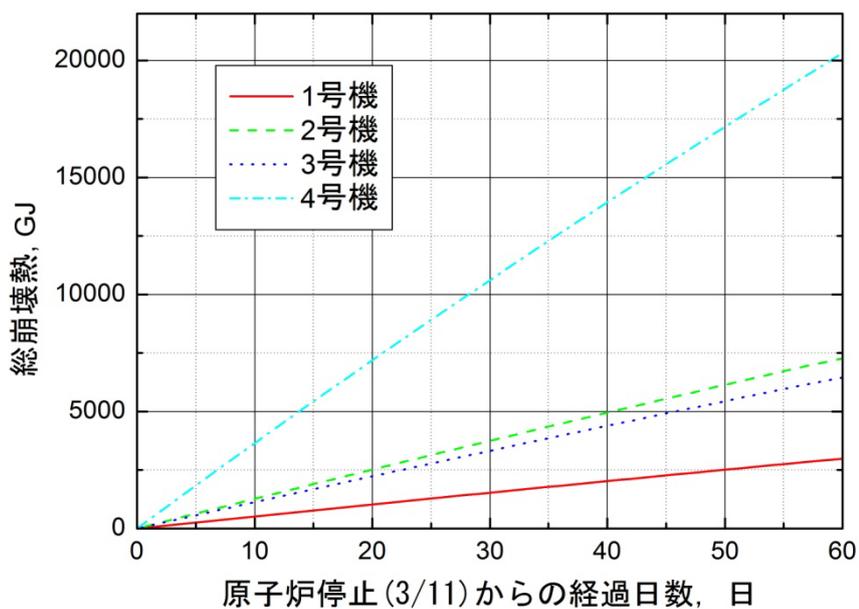


図 13 使用済み燃料棒貯蔵プール内燃料棒の総発熱量

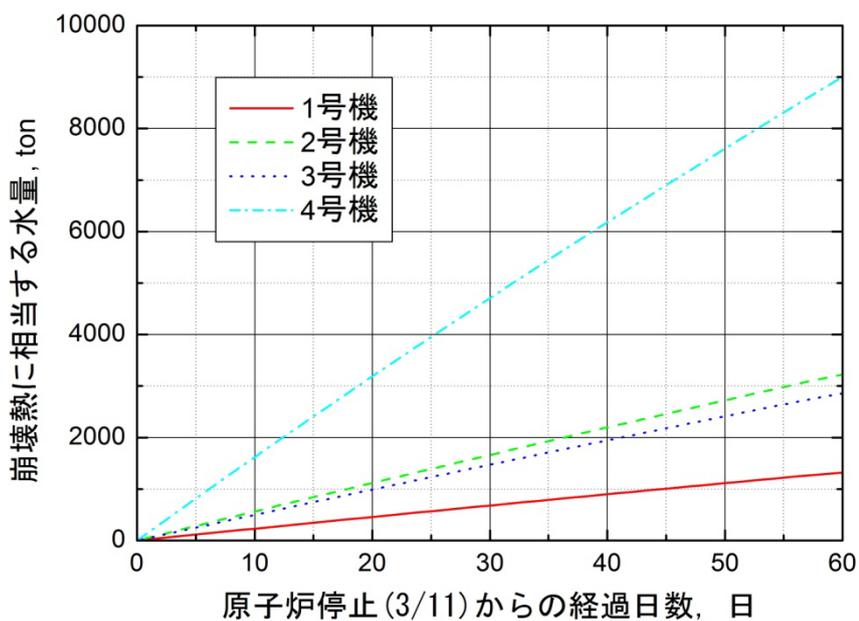


図 14 使用済み燃料棒貯蔵プール内燃料棒の総発熱量に相当する水量

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．また，4号機の使用済み燃料棒貯蔵プール内の総発熱量もまた，1号機の原子炉のそれを超えている．

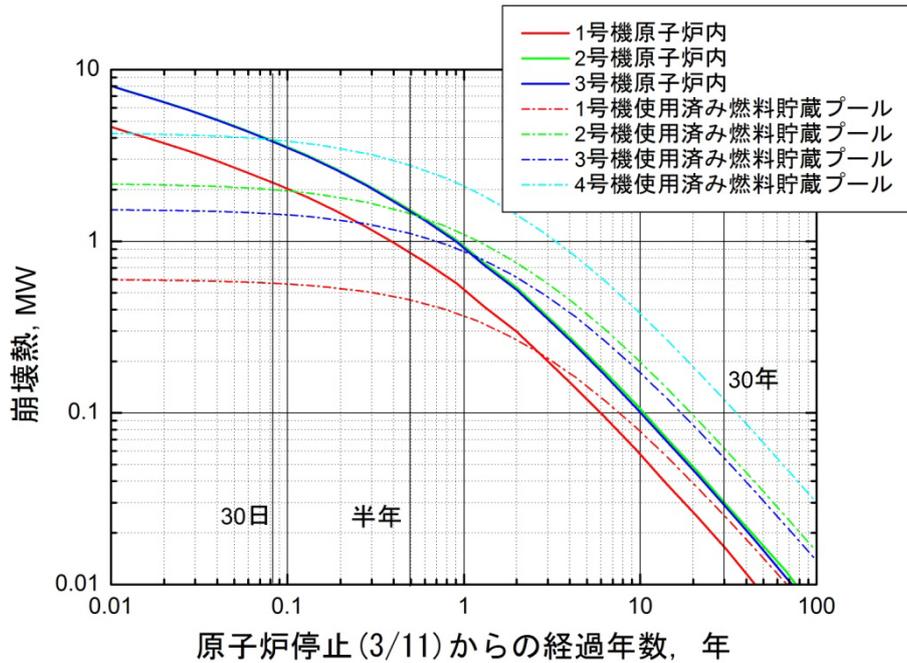


図 15 長期間にわたる崩壊熱の経時変化

図 14 に長期間にわたる崩壊熱の経時変化を示す。この結果から、2 か月半後に全ての原子炉内の発熱量よりも 4 号機の使用済み燃料棒貯蔵プール内の燃料棒による発熱量が高くなることや、1 年を経過する頃には、1 号機の使用済み燃料棒貯蔵プールを除いた使用済み燃料棒貯蔵プール内の燃料棒の発熱量が原子炉内を超える。これは、①使用済み燃料棒貯蔵プール内の燃料棒の本数が多いことと、②その燃料棒の燃料棒使用時間 t_s が原子炉内の燃料棒のそれに比べて 2 倍程度大きいことに起因する。

本報告は、公開された燃料棒サイクルの履歴に基づき、その安全側（高発熱側）で見積もっているもので、実際の燃料棒の崩壊熱予測とは異なることが予想される。また、崩壊熱は文献[5]が正しいとして推定しているので、長期の崩壊熱予測など実際と異なる値となることも予想される。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。

使用済み燃料棒貯蔵プール内の燃料棒の仮定を検証するため、原子力安全・保安院（http://www.nisa.meti.go.jp/earthquake_index.html）より公表および共同通信社（<http://www.kyodonews.jp/feature/news05/>）により報道された 4 号機使用済み燃料棒貯蔵プールへの放水量のデータと崩壊熱による蒸発量を比較した。公表されているデータを表 6 に示す。

表 6 公表データ

| 日付 | 放水量 ton | 情報源 | 備考 |
|------|------------|-----------|------------------------------|
| 3/20 | 160 | 共同通信社 | |
| 3/21 | 90 | 共同通信社 | |
| 3/22 | 150 | 原子力安全・保安院 | |
| 3/23 | 130 | 原子力安全・保安院 | |
| 3/24 | 150 | 原子力安全・保安院 | |
| 3/25 | 150 | 原子力安全・保安院 | 使用済燃料プールに燃料プール冷却材浄化系を用いた海水注入 |
| 3/27 | 125 | 原子力安全・保安院 | |
| 3/30 | 140 | 原子力安全・保安院 | |
| 4/1 | 180 | 原子力安全・保安院 | |
| 4/3 | 180 | 原子力安全・保安院 | |

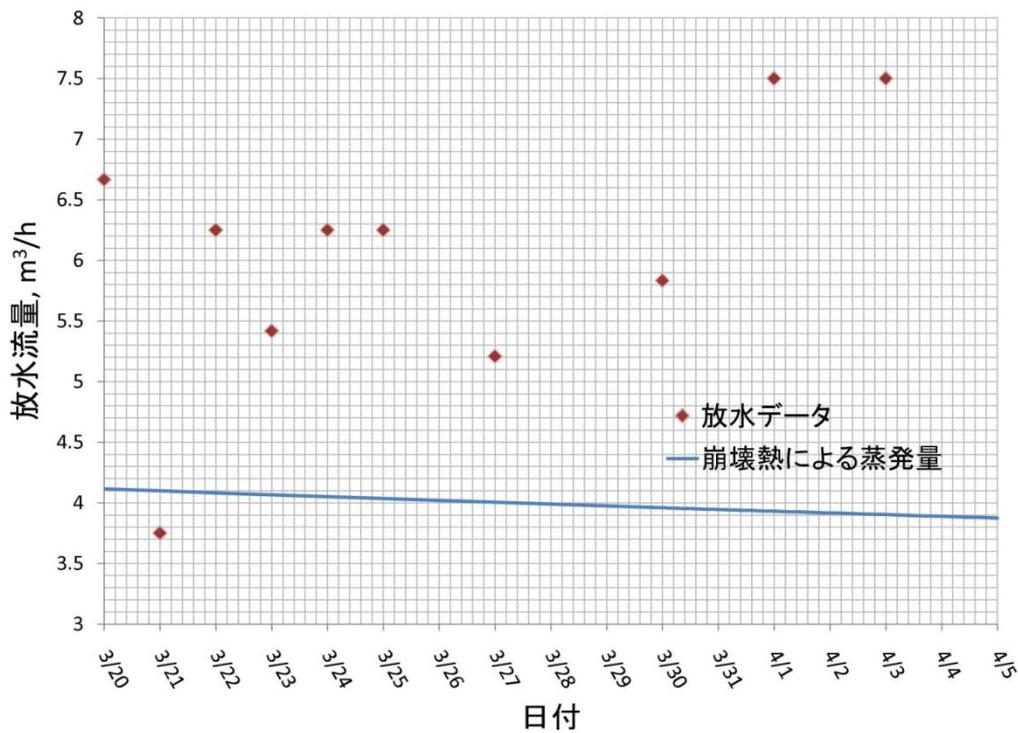


図 16 放水流量と崩壊熱による蒸発量の比較

図 16 は放水流量と崩壊熱による蒸発量の比較を表している。保安院から発表されているデータは一日の放水量であるので、それを 24 時間で割り、1 日の平均流量として換算した。また、ここでは放水した水が全てプールに入ったと仮定している。この結果から、一日の放水量は崩壊熱による蒸発量よりも大きな値を示していることがわかる。

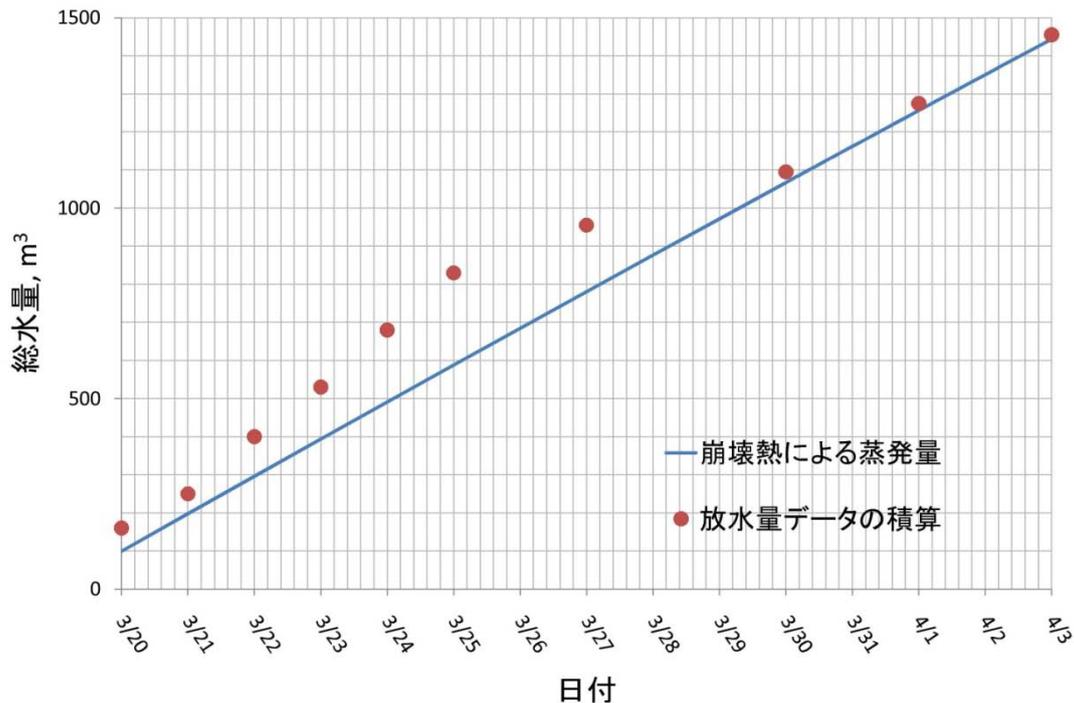


図 17 3月20日以降の崩壊熱による蒸発総量とこれまでの放水量の比較

図 17 は 3 月 20 日以降の崩壊熱による蒸発総量とこれまでの放水量の比較を表している。公表されている数値の積算量は、崩壊熱による蒸発量相当であることがわかる。このことから、本レポートでの仮定は現場での放水量とある程度一致しており、信頼できると考えられる。

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。