

崩壊熱

東京都市大学 吉田 正

I. はじめに

核燃料が化石燃料と異なる重要な点は、燃焼、つまり原子炉の運転が停止したあとも、一定の割合で発熱を続ける点にある。熱した鉄の棒は水につけて冷やせば、その後水中から取り出しても常温のままとどまる。しかし、原子炉の燃料棒は水につけて冷やせば一旦は温度が下がるものの、水から取り出せば継続する発熱のため、またじわじわと昇温が始まる。そのまま冷却されなければ破損や熔融にいたる。原子炉停止後も残るこの発熱は、原子炉の運転中に生成される不安定な原子核の時間遅れを伴う崩壊、つまり 崩壊ないし 崩壊に伴って発生するもので、崩壊熱とよばれる。原子炉停止後あるいは燃焼停止後の時間経過を冷却時間とよび、これは崩壊熱に関わる最も重要なパラメーターである。崩壊熱は、核分裂で生じた核分裂生成物 (Fission Product, FP) の 崩壊に伴うFP崩壊熱と、核燃料であるウランウムより重いアクチナイド核の 崩壊または 崩壊に伴い発生するアクチナイド崩壊熱に大別される。この二つは、はっきりと区別して考える必要がある。

II. FP崩壊熱

1. FP崩壊熱の由来と特性

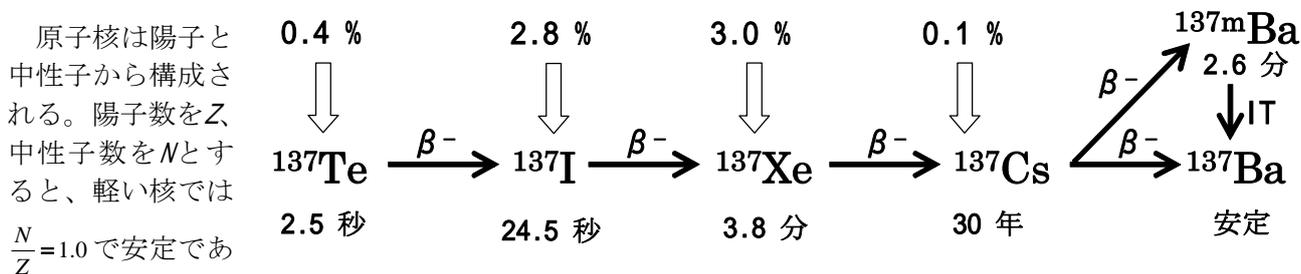


図1 崩壊連鎖の例 (質量数137)

など)、原子核が重くなるにつれ、この比は次第に大きくなり (^{93}Nb で1.3、 ^{133}Cs で1.4)、さらにウランでは1.6に達する。つまり、重い原子核ほど中性子の割合が高い。したがって、重い ^{235}U が中性子を吸収し、中位の重さのFPに分かれると、二個のFPはそれぞれ中性子過剰になる。中性子過剰で不安定なFPは 崩壊を繰り返し、中性子を陽子に変えながら安定核を目指す。崩壊 (正確には マイナス崩壊) を繰り返すだけだから、基本的に質量数は変化しない。このような 崩壊連鎖 (mass chainとも言う) の例を図1に示す。

これは質量数が137の場合で、上方からの白抜き矢印が核分裂による発生を表し、数字はそれぞれの同位体の発生割合を示す。発生割合は200%に規格化されており、独立収率 (independent yield) と呼ばれる。問題にしている同位体より上流に来る独立収率をすべて足し合わせた累積収率 (cumulative yield) もよく使われるので注意が必要である。問題にされることの多い ^{137}Cs の累積収率は、上流の同位体および自分自身の独立収率を全て足した値である6.3%となる。これは全FP中でも最も大きな部類に属する。

このような 崩壊連鎖過程で発生する 線と 線のエネルギーがFP崩壊熱の正体である。このとき、線や 線とほぼ同じエネルギーを持ったニュートリノ も発生するが、これは周辺の物質と殆ど全

く相互作用することなく、宇宙のかなたに飛び去る。この β を特別な検出器で検出し、原子炉炉心の挙動をモニターしようという研究が時々話題になる。このFP崩壊熱に關与するFPは約800核種に及ぶ。照射終了直後では、多数の短寿命FP核種がFP崩壊熱に寄与しているが、冷却時間とともに、主に寄与するFP核種の数は減ってゆく。

2. FP崩壊熱の予測・評価

停止後炉心、あるいは使用済み燃料集合体からの崩壊熱を知るための方法は大きく2つある。ひとつは、(1)公的機関で推奨した評価値をフィッティングした公式を使う方法。もうひとつは本章4節で述べる総和計算コードを使う方法である。

(1) フィッティングした公式を使う方法

(a)日本原子力学会推奨値¹⁾: これは1980年に当時のシグマ委員会崩壊熱評価ワーキングが作成したFP崩壊データファイル²⁾による総和計算値を33項の指数関数で冷却時間 t の関数としてフィッティングしたものである。文献3)に²³⁵U、²³⁸U、²³⁹Pu、²⁴⁰Pu、²⁴¹Puの5核種について、フィッティング式中に表れる各々66個(33 × 2)の定数が与えられている。但し、後に述べる中性子捕獲効果、アクチナイド崩壊熱は別途考慮しなければならない。前者に関する補正係数は文献¹⁾中に与えられている。

一定出力で一定時間運転後の崩壊熱は、瞬時照射後の崩壊熱を運転時間について積分すれば得られるが、その結果もまた簡単な指数関数多項式となる。したがって、EXCEL等の関数計算機能を用いて容易に計算が可能である。これが指数関数多項式を用いる大きな利点である。

(b)アメリカ原子力学会ANS5.1委員会推奨値:これはアメリカ原子力学会Standard CommitteeのANS5.1ワーキンググループが、総和計算結果と核燃料サンプル照射実験結果を勘案し、評価した崩壊熱曲線を23項の指数関数で冷却時間 t の関数としてフィッティングしたものである。文献4)に²³⁵U、²³⁸U、²³⁹Pu、²⁴¹Puの4核種について、フィッティング式中に表れる、それぞれ46個の定数が与えられている。

(c)Shureの式⁵⁾: Westinghouse社のShureが瞬時照射後の崩壊熱を簡単な式で冷却時間 t の関数としてフィッティングしたもので、今日でも根強く使用されているようである。

(2) 総和計算コードと付随するライブラリーを使う方法

(a) ORIGIN2コード⁶⁾を使用する方法: ORIGIN2コードは入力の簡明さと網羅的な出力など、使い勝手が良く高い利用価値があるため、世界で広く使われている。付随する核データライブラリーにより計算結果は変わるので注意が必要である。わが国で評価済み核データライブラリーJENDL-3.3とJNDC FP Decay Library²⁾を元に作られたORLIB3.3⁷⁾の使用をお勧めしたい。このORLIB3.3を使用して、計算条件を厳密に合わせればFP崩壊熱については(1)で述べた日本原子力学会推奨値が再現される。(1)(a)~(b)の方法ではFP崩壊熱しか計算でき

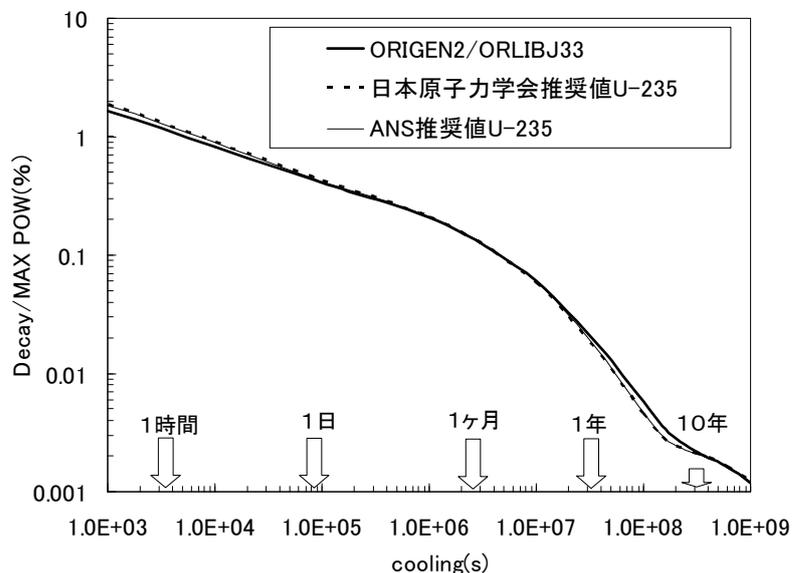


図2 U-235のFP崩壊熱(2年照射)

ないが、ORIGEN2を用いれば後述するアクチナイド崩壊熱も同時に計算できるし、崩壊熱にどのような核種がどれだけ寄与しているかなど、豊富な計算結果が同時に得られる利点がある。

(b) FPGSコード⁸⁾ を使用する方法

FPGSコードも、国内広く使用されている。機能としては、上記ORIGEN2とほぼ同等であるが、ENDF/BやJENDLに収められた核分裂収率、崩壊データ、ENSDF (米国NNDCが管理する核構造・崩壊データファイル)などを処理し、独自の核データライブラリーを整備・更新する機能がある。

上記、(1)、(2)とはやや異なるが、McMaster大学から出版されている評価式⁹⁾も、その使いやすさから、最近ときとして使われているようである。

3. ²³⁵UのFP崩壊熱時間挙動

図2は²³⁵UのFP崩壊熱を、前節 (1)(a) 日本原子力学会推奨値フィッティング式、(b)アメリカ原子力学会ANS5.1フィッティング式、(2)(a)ORLIBJ3.3ライブラリーを使ったORIGEN-2コードでそれぞれ計算した結果である。比較を容易にするため、後節で述べる中性子捕獲効果、燃焼中に生成されるプルトニウムの効果、アクチナイド崩壊熱等は一切考慮せず、²³⁵Uだけが一定出力で1.9年間継続して燃焼した後のFP崩壊熱を、燃焼時 (運転時) 出力に対する比として表した。燃焼停止直後のFP崩壊熱は運転時出力の6%強であるが、始めは急速に、しかしその後は次第にゆっくりと減少してゆく。具体的に記すと、発熱が燃焼停止直後の10分の1になるのは8時間後、100分の1になるのは4ヶ月後、1000分の1になるのは3年後となる。更に燃焼停止後10年を経てもFP崩壊熱レベルは燃焼停止直後の2000分の1である。後に述べるが、停止後10年になると、ウラン燃料であっても、マイナーアクチナイド (MA) のうち²⁴⁴Cmと²³⁸Puからの発熱が無視できなくなる。

表1 1F2タービン建屋滞留水中のCs 同位体数密度比

順位	核種	寄与 (%)
1	Pr-144	34.0
2	Nb-95	17.8
3	Rh-106	13.7
4	Zr-95	10.0
5	Y-91	4.9
6	Cs-134	3.7
7	Ce-144	3.0
8	Sr-89	2.8
9	Ru-103	2.0
10	Y-90	2.0

本セミナー時点 (8月4日) で、停止 (2011年3月11日) から約140日になる福島第一の1~3号機で、²³⁵UのFP崩壊熱に効いている上位10核種を表1に示す。このうち、¹⁴⁴Pr、⁹⁵Nb、¹⁰⁶Rh、⁹⁵Zrの4核種だけで²³⁵U全FP崩壊熱の76%を、10核種全部で94%を占める。ちなみに、トップの¹⁴⁴Prの半減期は17.3分しかない。このような短半減期核が炉停止後5ヶ月もして効いているのは、質量数144の崩壊連鎖上、¹⁴⁴Prの直前に半減期が285日と長い¹⁴⁴Ceがあり、これが¹⁴⁴Prの生成を遅らせているからである。質量数Aが偶数の崩壊連鎖では特にこのようなことが往々にして起きるので注意が必要である。

4. FP崩壊熱の測定と総和計算

崩壊熱の実測データは多数存在する。典型的な例として東京大学の秋山らの測定¹⁰⁾ および米国Oak Ridge国立研究所のDickensらの測定¹¹⁾ の二例を紹介しておく。ともに²³⁵U、²³⁹Pu等の純粋なサンプルを実験炉炉心で照射して取り出し、プラスチックシンチレーターで線成分を、NaI(Tl)シンチレーターで線成分をそれぞれ測定し、エネルギーで積分してFP崩壊熱の線成分、線成分としている。両者とも、瞬時照射後の冷却時間tの関数として測定結果を整理している。

上記のサンプル照射実験データは、残念ながら冷却時間が最大でも6時間 (東大の測定) までしかない。当時問題とされた冷却材喪失事故時の緊急時炉心冷却系 (ECCS) の設計上もっとも問題となる冷却時間は炉停止後数時間であると考えられたこと、および測定上の問題 (S/N比) がその理由である。長時間冷却後の数少ない測定データとして、青山らによる高速実験炉「常陽」での測定がある¹²⁾。青山らは平均燃焼度約60Gwd/tの炉心燃料集合体を、特別に作られたカロリメーターに封入し、燃焼終了後

24～258日後の崩壊熱の直接測定を行った。しかしながら、JENDL-3.2とJNDC FP Decay Library²⁾に基づいた詳細な解析計算にも関わらず、測定値と計算値の一致は十分でなく、計算が10%程度の過小評価となったと報告されている¹²⁾。長期冷却後の崩壊熱計算値に対しては、当面、10%程度の予測誤差は生じうるものであると理解しておくべきであろう。

FP崩壊熱の計算としては、総和計算という方法が殆ど唯一のやり方である。冷却時間 t における崩壊熱 $f(t)$ は

$$f(t) = \sum_i \lambda_i \cdot (E_{\beta}^i + E_{\gamma}^i) \cdot N(t)$$

で与えられる。全FP核種について総和をとるので総和計算 (Summation Calculation) とよばれる。

ここで λ_i は核種 i の崩壊定数、 $N(t)$ は核種 i の時刻 t における存在量である。また、 E_{β}^i 、 E_{γ}^i は核種 i が一回の崩壊を起こす際に放出する β 線及び γ 線の平均エネルギーである。これら λ_i 、 E_{β}^i 、 E_{γ}^i を詳細な崩壊チェーンに関する記述とともに網羅的にまとめたのがJNDC FP Decay Libraryを始めとするFP崩壊データライブラリーである。崩壊熱計算には核分裂収率データが必要となる。ORIGEN2用に作られたデータライブラリーの一例が、前節(1)(a)で紹介したORLIB3.3ライブラリーである。

5. プルトニウム生成および燃焼の問題

ウラン燃料の燃焼中には²³⁸Uの中性子捕獲反応が起き続ける。生成した²³⁹Uは2回の崩壊を経て²³⁹Puとなる。



核種に付した時間は両核種の半減期である。この2回の崩壊も時間遅れを伴うから、崩壊熱の一部として考慮する必要がある。第4節(1)(a)日本原子力学会推奨値の場合も、(1)(b)ANS5.1推奨値の場合も、それぞれ文献1)あるいは4)に、この過程で放出される崩壊熱の積算方法が与えられている。文献1)の日本原子力学会推奨値では以下のように述べられている。

$U-239$ 、 $Np-239$ をそれぞれインデックス1, 2で表し、 T を照射時間、 t を冷却時間とすると単位核分裂 (fission/s) あたりのアクチナイド*¹⁾ 崩壊熱 $P(T, t)$ (MeV / fission) は、次式で与えられる。

$$P_1(T, t) = (C^0 / F) E_1 \cdot [1 - \exp(-\lambda_1 T)] \exp(-\lambda_1 t),$$

$$P_2(T, t) = (C^0 / F) E_2 \cdot [1 / (\lambda_1 - \lambda_2)] \cdot [\lambda_1 \{1 - \exp(-\lambda_2 T)\} \exp(-\lambda_2 t) - \lambda_2 \{1 - \exp(-\lambda_1 T)\} \exp(-\lambda_1 t)].$$

ここで、 λ_1 、 λ_2 : 崩壊の崩壊定数

$$\lambda_1 = 4.922 \times 10^{-4} \text{ 1/s}$$

$$\lambda_2 = 3.406 \times 10^{-6} \text{ 1/s}$$

E_1 、 E_2 : 崩壊の放出エネルギー

$$E_1 = 0.447 \text{ MeV} \quad (\beta 88.4\%, \gamma 11.6\%)$$

$$E_2 = 0.426 \text{ MeV} \quad (\beta 59.2\%, \gamma 40.8\%)$$

$C_0=N_0 c$: U-238の中性子捕獲率 (capture/s)
 F : 核分裂率(fission/s)

. 中略

運転出力 P_0 に対するアクチナイド崩壊熱は、 Q_f を核分裂放出エネルギーとすると

$$P(\text{actinide}) = (P_0 / Q_f)[P_1(T, t) + P_2(T, t)]$$

と与えられる。また (C_0 / F) は利用者が評価すること

とある。なお、上記引用中では Q_f については表が与えられて、U-235で202.2MeV、Pu-239で210.9となっている (いずれも熱中性子核分裂)。

更に、ウラン燃料であっても、燃焼後期になると、 ^{239}Pu による核分裂発熱は全核発熱の3~4割を占めるようになる。従って、FP崩壊熱も ^{235}U だけが核分裂に与っているとした場合とは異なってくる。この効果を(1) (a)ないし(1) (b)に基づく計算で考慮するには困難が伴う。しかし、(2) (a) ORIGEN2コードあるいは(2) (b) FPGSコードを用いれば、本節で述べた二つの効果は自然に計算に入ってくる。

III. MOX燃料とアクチナイド崩壊熱

核分裂連鎖反応を停止した後の炉心発熱はFPからのものだけではない。図3、4に、ウラン燃料及びMOX燃料崩壊熱の内訳を示す。使用済みウラン燃料の場合、冷却時間数年までFP崩壊熱が支配的で、アクチナイド崩壊熱はほぼ一桁小さい。しかし冷却時間百年弱で両者の大小関係は逆転する。軽水炉MOX燃料では始めから両者の差異は小さく、冷却時間3~4年で両者は同程度になり、その後はアクチナイド崩壊熱が支配的になってゆく。なおここには、すでに述べた過程 $^{238}\text{U}(n, \gamma) ^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ に起因する崩壊熱は含めていない。

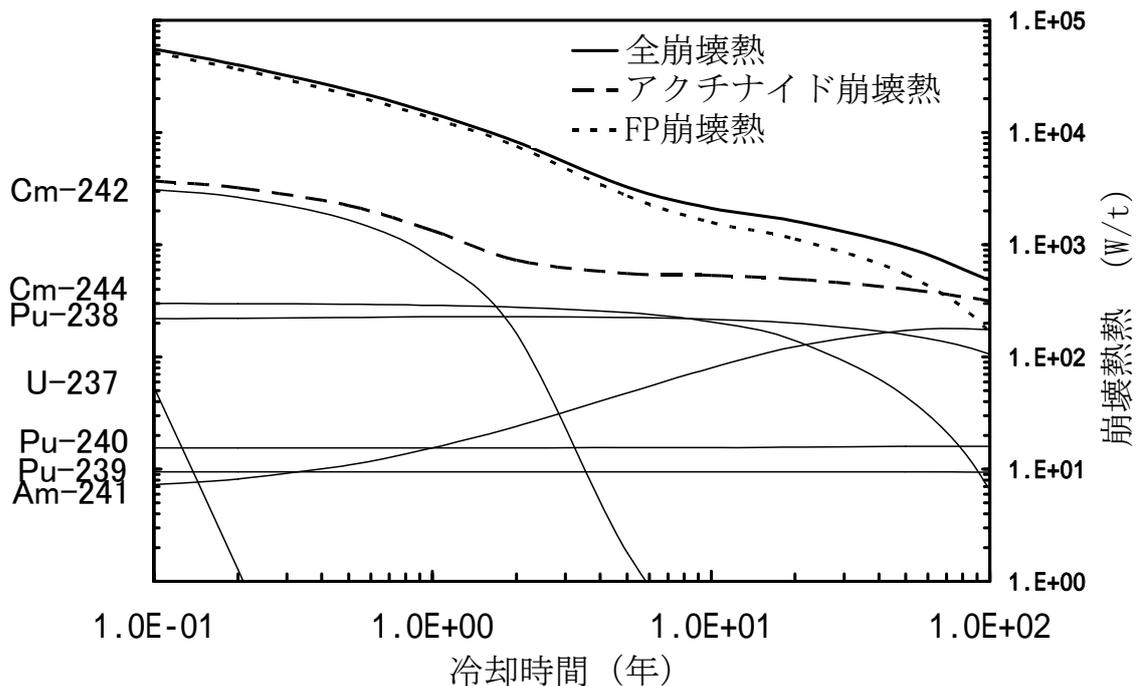


図3 ウラン燃料の燃焼停止後のFP及びアクチナイド崩壊熱

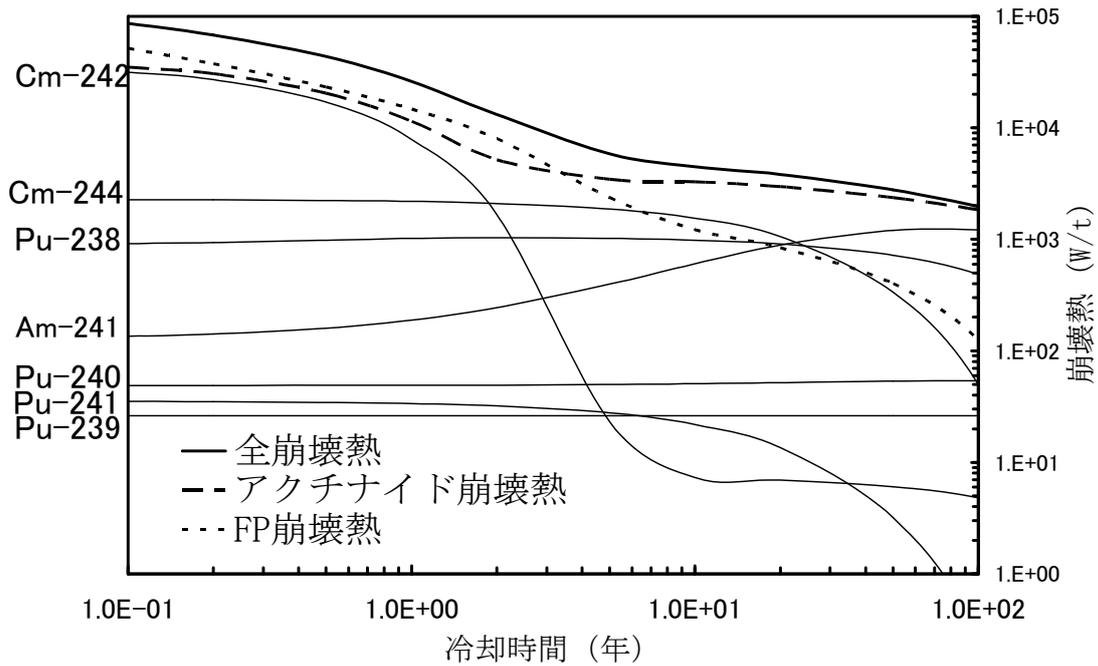


図4 MOX燃料の燃焼停止後のFP及びアクチナイド崩壊熱

IV. 中性子捕獲効果、燃焼履歴

図5に東京電力が3月に発表した福島第一発電所2号機タービン建屋滞留水の核種別放射線強度か

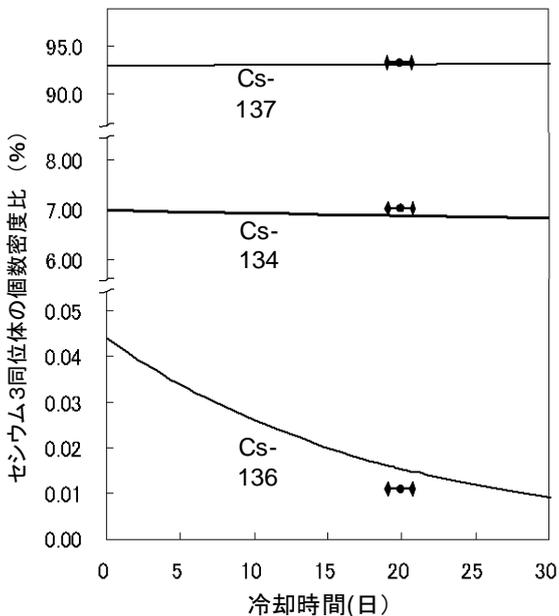


図5 2号機タービン建屋滞留水中のCs同位体個数密度比 (ORIGEN2/ORLIBJ33計算)

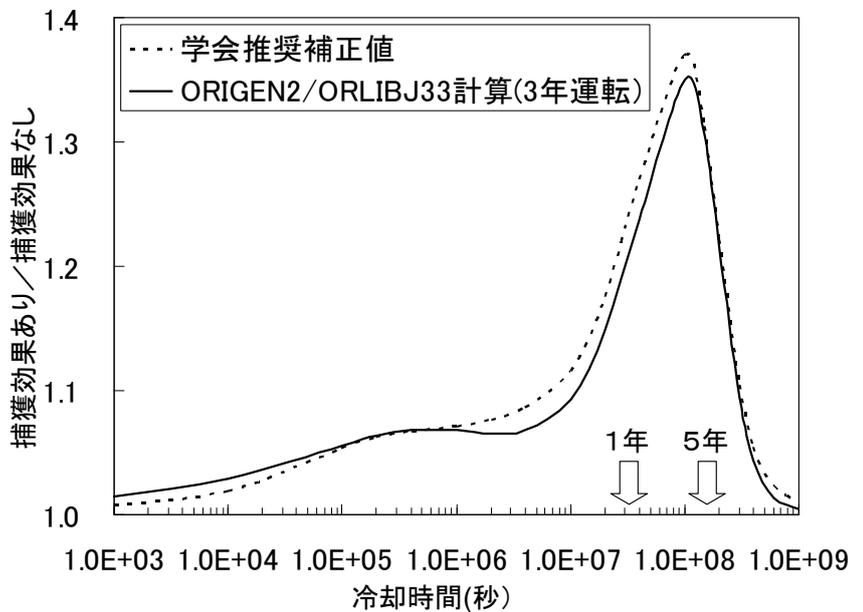


図6 U235のFP崩壊熱における中性子捕獲効果

ら換算したセシウム同位体数密度の比較結果を示す¹³⁾。横軸は炉停止後の時間経過で、このデータは本年3月30日に採取されたとすると、計算は実測値をほぼ再現している。計算には(2) (a)のORLIBJ33とORIGEN2コードを用いた。

本図中の¹³⁴Csは極めて特殊な同位体である。²³⁵Uの熱中性子核分裂での累積収率は 7×10^{-6} %で実質

的に無きに等しい。この同位体は半減期約2年で、原子炉運転中 ^{133}Cs (安定核：累積収率6.7%) が中性子を捕獲して生成するのである。いわば寝た子を起こすようにして生成され、冷却時間1～3年でのFP崩壊熱を何割か押し上げる。このような挙動をする核種は他にもあり、中にはFP崩壊熱レベルを下げる効果を持つものもある。これら中性子捕獲効果を崩壊熱評価に取り込むために、第4節(1) (a) 日本原子力学会推奨値、および(1) (b) ANS5.1推奨値の場合は、それぞれ文献1)あるいは4)に補正係数があたえられている。図6に ^{235}U のFP崩壊熱計算に、この効果を入れた場合と入れない場合の比を示す。点線は文献1)に与えられた補正係数。実線はORLIBJ33と ORIGEN2を使った計算結果である。ORIGEN2あるいはFPGSで普通に計算すれば、この効果は自然に計算に入ってくる。最後に、燃焼期間の違いがFP崩壊熱に及ぼす影響に触れておこう。燃焼停止直後では1年燃焼と5年燃焼の間に崩壊熱レベルに殆ど差はないが、120日後には約2倍、1年後で約3倍、3年後で4倍強と、次第に差が開いてゆく。もちろん、第3節に記したように、崩壊熱レベルそのものは、冷却時間とともに減少してゆく。

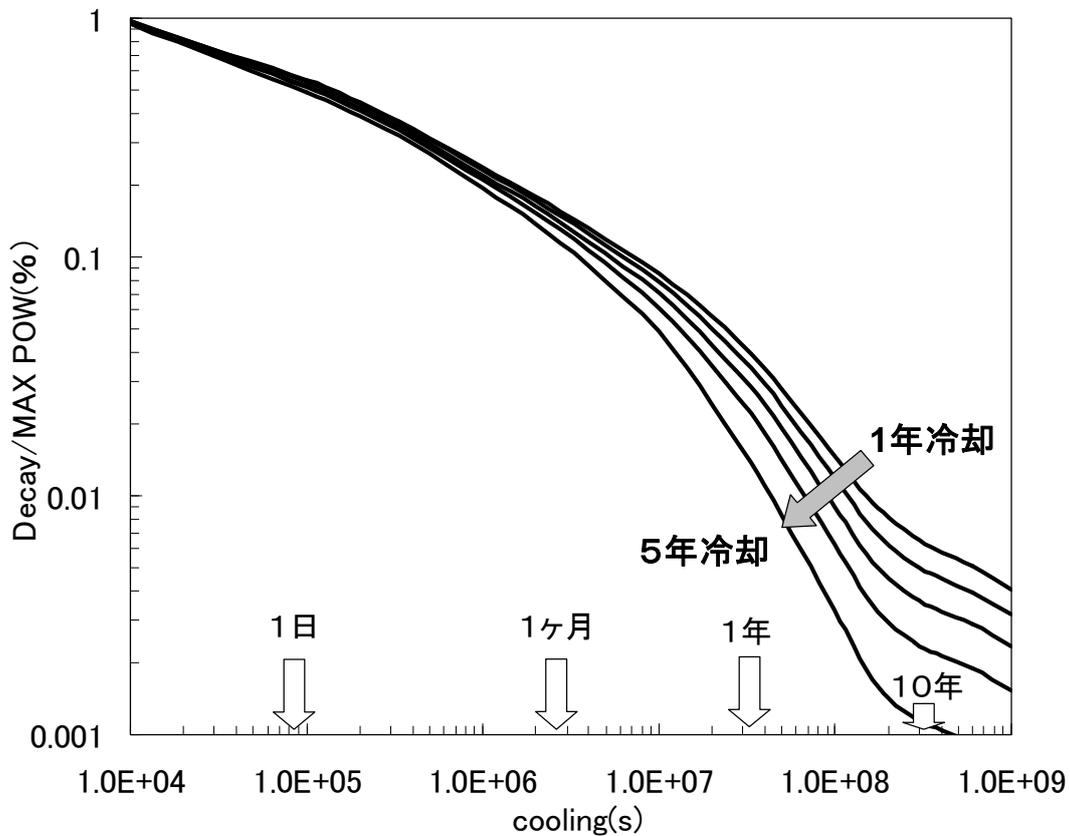


図7 U-235 核分裂生成物崩壊熱の冷却時間依存性

V. FP崩壊熱計算上の問題

1. 短い冷却時間における問題点

図8、図9を参照されたい。これらは、それぞれPu-239瞬時照射後のFP崩壊熱 線成分、線成分について、II-4節でのべた測定値と総和計算値の比較を示したものである。計算には、JNDC FP Decay Libraryではなく、欧州のJEF系列のJEF2.2とJEFF3.1を用いた。ここで明らかなのは、測定との一致という点からは新しいJEFF3.2(2004)が古いJEF2.2(1995)より明らかに劣っていることである。これはパンデモニウム問題と呼ばれ、核の崩壊データ (特に 崩壊娘核の崩壊図表) に関わる深刻な問

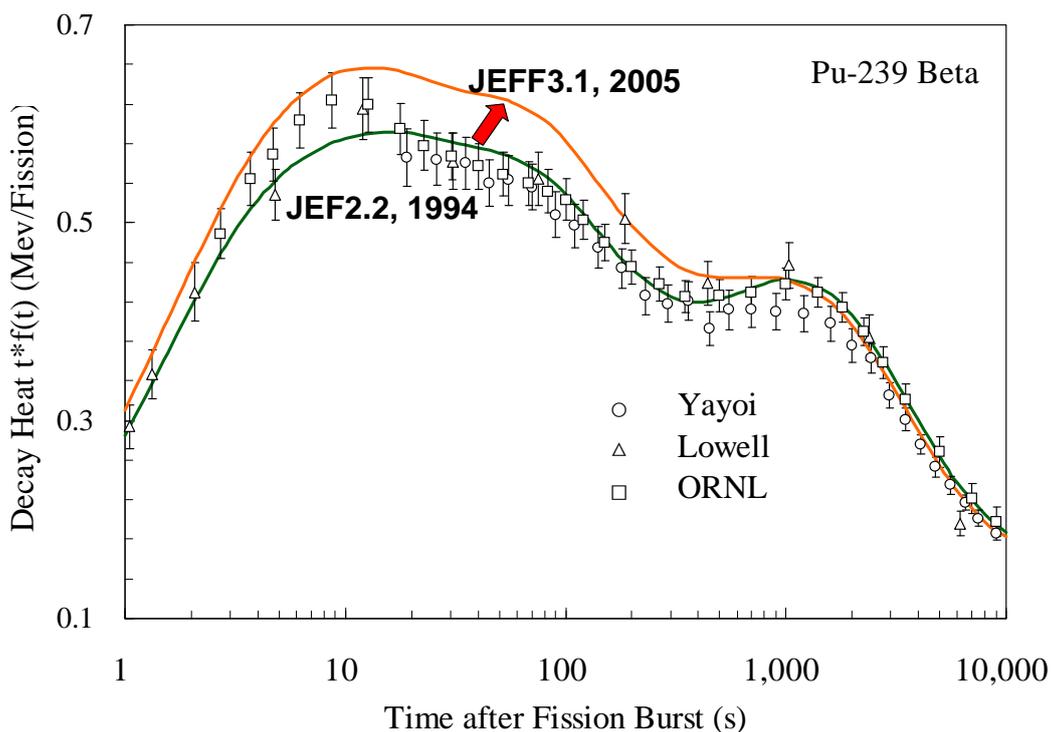


図8 JEF崩壊データライブラリーに見られるpandemonium効果
U-235 瞬時照射後崩壊熱ベータ線成分

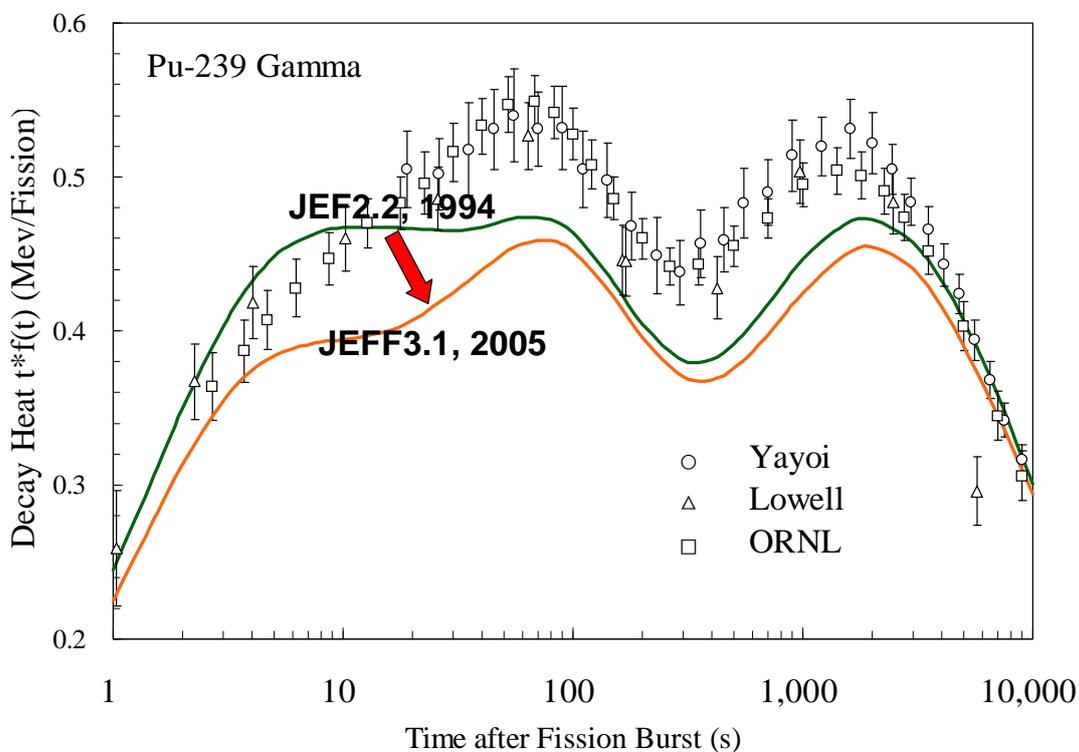


図9 JEF崩壊データライブラリーに見られるpandemonium効果
U-235 瞬時照射後崩壊熱ベータ線成分

題ある。半減期が短くQ値の大きい核に対して、1994年～2005年の10年の間に刊行された最新の崩壊データを新たに採用したため、線成分(図8)が著しく過大に、線成分(図9)が逆に著しく過小に評価されているのである。このことは、新しい、短寿命でQ値の高い核種の娘核の崩壊図式が、大

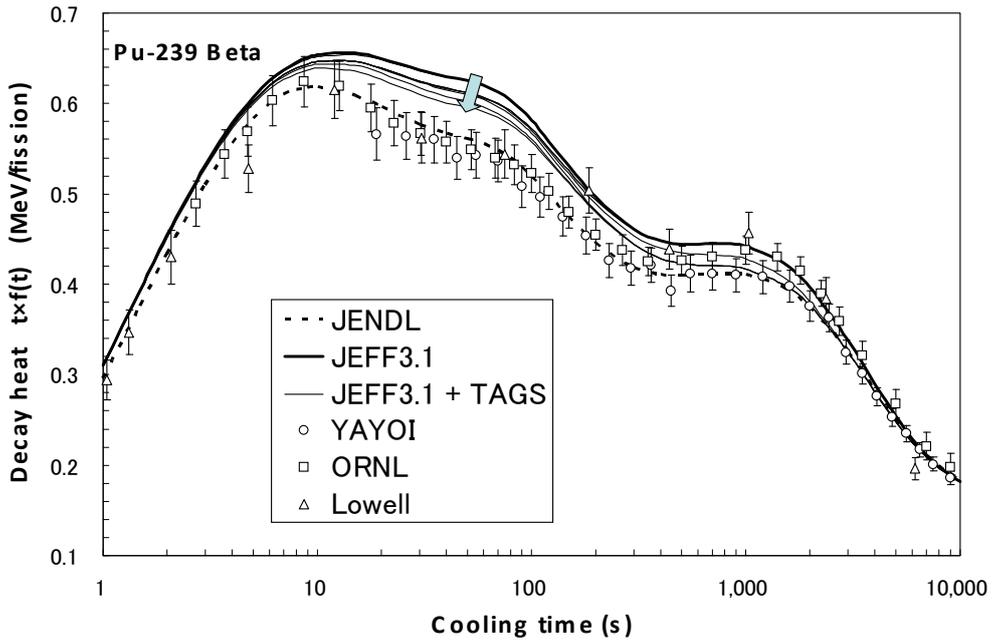


図10 TAGS測定データ導入による ^{239}Pu 瞬時照射熱崩壊熱計算の精度向上
(1) β 線成分

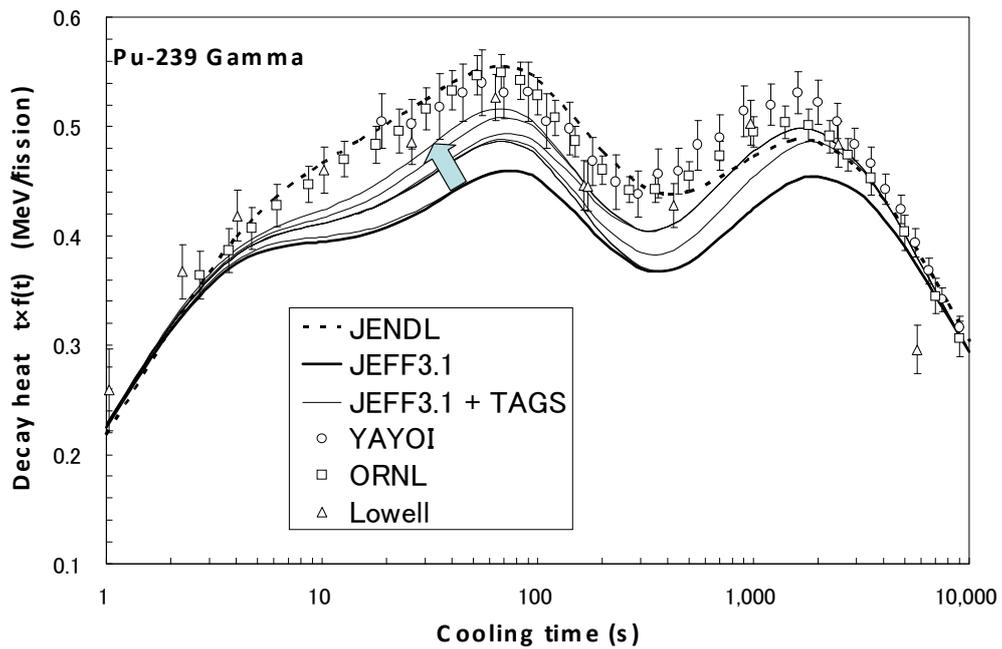


図11 TAGS測定データ導入による ^{239}Pu 瞬時照射熱崩壊熱計算の精度向上
(2) γ 線成分

きくパндеモニウム問題に侵されており、新しいデータを取り入れれば取り入れるほど、測定との一致が悪化してしまうというディレンマをはっきりと示している。

しかしここで、パндеモニウム問題に対する測定上の切り札が現れた。これがTAGS(Total

Absorption Gamma-Ray Spectrometer)であり、この方法による測定結果が昨年秋に公開された¹⁴⁾。TAGS法で測定されたのは、²³⁹Pu崩壊熱に対する寄与が大きいとして選ばれた¹⁰¹Nb、¹⁰⁵Mo、¹⁰²Tc、¹⁰⁴Tc、¹⁰⁵Tc、¹⁰⁶Tc、¹⁰⁷Tcの7核種である。パンデモニウム問題の詳細、及び測定にまでいたる経緯は文献¹⁵⁾に譲る。ここでは結果だけを示しておこう。図10、11がそれである。ここでは、既出の¹⁰¹Nb、¹⁰⁵Mo、¹⁰²Tc、¹⁰⁴Tc、¹⁰⁵Tc、¹⁰⁶Tc、¹⁰⁷Tcの7核種について、JEFF3.1の E 値、 E 値を1核種ずつTAGSによる新しい測定値で置き換えて行くに従い、計算結果はサンプル照射実験結果にどんどん近づいてゆくことがわかる。この結果は、TAGS測定が、期待されたようにパンデモニウム問題を克服するための強力な測定手法であることを示している。サンプル照射実験データを完全には再現していないが、これは測定核種を単に増やしてゆけばよいと考えられる。一言付け加えるなら、あえてJEFF-3.2を比較のベースとした理由である。それは、JEFF-3.2が、JENDLのようにパンデモニウム問題を回避する目的での理論計算等の導入を一切行っておらず、図8、9で見てきたようにこの問題をそのまま全て孕んでいるからである。このことと深く関係するが、図10、11において、測定との一致は点線のJENDL (= JNDC FP Decay Library)の方がまだ勝っているのではないか、との疑問を持たれるかもしれない。この点についても¹⁵⁾に譲る。

・ 長い冷却時間における問題点

残念ながら、すでにのべたように、サンプル照射による崩壊熱直接測定に関しては、冷却時間が最大でも6時間程度までしかない。長時間冷却後の数少ない測定データとして、青山らによる高速実験炉「常陽」での測定がある(燃焼終了後24~258日)が、JENDL-3.2とJNDC FP崩壊データライブラリーに基づいた詳細な解析計算にも関わらず、測定値と計算値の一致は十分でない。このような実測データ不足のため、長い冷却時間での崩壊熱評価は、総和計算に過度に依存せざるをえないという問題が残る。一例を挙げる。本稿冒頭、図2で見たように、²³⁵UのFP崩壊熱に関して日本原子力学会推奨値とアメリカ原子力学会ANS5.1委員会推奨値とは、驚くほど一致した曲線をあたえている。両者は別の時期に独立に評価されたものであるから、この一致を信頼度の証であると考えられることもできよう。しかし一歩退いて考えると、10⁵秒以上の冷却時間では、参照すべき崩壊熱直接測定は殆どなく、どうしても総和計算に依存せざるをえない。しかし、総和計算の結果を大きく左右する E 値、 E 値は元をただせば同じデータベースENSDF (Evaluated Nuclear Structure and Decay Data File) 中のデータから算出されていることを考えると、両者が独立であると考えるのは正しくない。したがって、長期冷却崩壊熱で利いてくるFP核種については(その数は決して多くない)、TAGSを含め、更なる崩壊データの取得が重要である。当然、長冷却時間に対する崩壊熱直接測定も、何らかの方法でなされるべきであろう。

VII. おわりに

原子炉崩壊熱の計算は比較的容易なものである。しかし、正確を期す必要のあるときは、計算値あるいは評価値の素性がどのようなものかを正確に知っている必要がある。²³⁹U ²³⁹Np ²³⁹Puに起因する成分、あるいはMA成分は入っているのか。あるいはFPの中性子捕獲効果はどう扱われているのか。場合によってはKrやXeといった希ガス成分、IやCsといった水に溶けやすい成分の多くがすでに燃料から抜けてしまっているかもしれない。停止後原子炉の状況を正しく把握し、それに応じた評価・計算を行う必要がある。

参考文献

- 1) 「原子炉崩壊熱とその推奨値」、日本原子力学会「原子炉崩壊熱基準」研究専門委員会(1989)
- 2) Tasaka K. *et al.*: “JNDC Nuclear Data Library of Fission Products,” JAERI 1287 (1983)
- 3) 「崩壊熱の推奨値とその使用法」、日本原子力学会「原子炉崩壊熱基準」研究専門委員会(1990)
- 4) American National Standard, Decay Heat Power in Light Water Reactors; ANSI/ANS-5.1-2005, (2005)
- 5) Shure K.: In USAEC Report WAPD-BT-24 (1961)
- 6) Croff A.G.: ORNL/TM-7175 (1980)

- 7) Katakura. J. *et al*: JAERI-Data/Code 2002-21 (2002) : データは日本高度情報科学研究機構 (RIST) より入手可能
- 8) 伊原均他 : 、JAERI-Data/Code 95-014 (1995)
- 9) Technical Report 1998-03, McMaster University (1999)
- 10) Akiyama M. and An S.: Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Antwerp, p.237 (1982) and references therein
- 11) Dickens J.K., Love T.A., McConnell J.W. and Peelle W.R.: Nucl.Sci.Eng., **74**,106(1980): *ibid.*, **78**,126(1981)
- 12) 青山卓史他 : 日本原子力学会誌、**41** (1999) 946-953
- 13) 松本裕人他 : 日本原子力学会2011年秋の大会
- 14) Algora A. *et al.* : *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 202501 (2010)
- 15) 吉田 正 : 「原子炉崩壊熱におけるpandemonium問題の発見からその解決へ」核データニュース、No.99(2011): http://www.ndc.jaea.go.jp/JNDC/ND-News/index_J.html
- 14) ENSDF, <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf>