

わが国における崩壊熱基準

(京都大学工学部原子核工学科) 木村 逸郎

1. 緒言

このたび、原子力学会「原子炉崩壊熱基準」の推奨値にその誤差の3倍を加えたものが、原子力安全委員会の「軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針」の崩壊熱の熱源データに加えられた。すなわち、昭和62年、名古屋大学工学部加藤敏郎教授を主査とした「原子炉崩壊熱基準」研究専門委員会が、それ以前からシグマ特別専門・研究委員会を中心に蓄積されてきた崩壊熱に関する研究成果を取りまとめ、基準データとして提示した推奨値⁽¹⁾が国の指針の中に正式に採用されたのである。私は崩壊熱の専門家ではないが、原子力安全委員会の原子炉安全基準部会の一員として、とくにその中に設置された崩壊熱小委員会の主査として、上記の学会推奨値を軽水型動力炉の非常用炉心冷却系すなわちECCSの性能評価指針の中に採用する仕事をやらして頂いたことにより、この報告を仰せつかった次第で、崩壊熱を専門とされる大家の前でお話しをするのは苦手だが、あえて釈迦に説法のもりで報告する。今は亡き飯島俊吾氏も天界から見ておられるかと思うと身が引き締まる。

さて、「指針」とは一体何か、ご存知の方も多いと思うが、念のために説明しておこう。法律により、原子炉の設置には国の許可が必要とされており、そのためにいくつかの審査がなされるが、その最大のものはいわゆる安全審査である。安全審査は、通産省などの第1段審査に引き続き、原子力安全委員会が第2段審査を行うが、それは主として原子炉安全専門審査会によってなされ、当該原子炉の安全設計や安全評価などの内容が厳しく検討される。そのためにいくつかの指針があり、それらに照らして審査されるのが通例である。指針の第一に、「立地審査指針」があり、次いで、「安全設計審査指針」、「安全評価審査指針」その他がある。炉心の冷却系については、通常時のものと事故時にECCSが作動した場合のものがある。ECCSの作動ということは滅多にないと思われてきたが、昨年と今年、関電美浜と東電福島でその作動が続き、この指針の意義が身近になったともいえる。

ところで、原子炉施設その他で、崩壊熱データがどのように必要かについて表1に示す⁽¹⁾。まず、通常停止と異常な過渡変化では、このように10⁴秒までと10⁶秒までに分けて対応がとられるが、ともに崩壊熱データが必要である。次に事故とくに1次系配管破断のようなとき、ECCSが働いて炉心を冠水し、かつ冷却するが、それとともに格納容器の冷却も必要となる。この場合、主熱源としての崩壊熱が重要なことは言うまでもない。

表 1 原子炉施設等の安全設計と安全評価に必要な崩壊熱データ（軽水炉）

時間(s)	項目	必要精度(%)
~ 10 ⁴	通常停止、異常停止時1次系熱除去	2 ~ 5
10 ⁴ ~ 10 ⁶	同上余熱除去	5
~ 10 ⁴	非常用炉心冷却(ECCS) 格納容器冷却	2 ~ 5
10 ⁴ ~ 10 ⁷	同上余熱除去	5
10 ⁵ ~ 10 ⁸	使用済燃料貯蔵	5
10 ⁷ ~ 10 ⁹	使用済燃料輸送、再処理	5
10 ⁸ ~ 10 ¹¹	高レベル放射性廃棄物管理	10?

必要精度は「原子炉崩壊熱とその推奨値」⁽¹⁾ p.99, 表1.2参照、厳しい方の値を採用

次に使用済燃料は、プールに蓄えられ、やがて再処理施設へと輸送される。再処理の後、核燃料物質は取り戻され、一方では放射性廃棄物が管理される。これらバックエンドでも崩壊熱は重要である。

学会の「原子炉崩壊熱基準」研究専門委員会でもなされたし、今回原子炉安全基準部会崩壊熱小委員会でも、これまで原子炉や核燃料施設の安全審査などに用いられてきた崩壊熱データについて調査したが、その結果、原子炉の種類により、また核燃料施設でかなり異なった崩壊熱のデータが用いられていることが分かった。これは結果的に、そんなに大きな差異を生むものではないが、一般的に言って、しっかりとした信頼のおける基準を指針の中に示しておくことが必要であり、いろいろと異なったデータを使うのは感心しない。

2. 崩壊熱データの現状と基準

原子炉停止後、非常に短い時間内は、なお核分裂が続くが、やがて次の三つが主となる⁽¹⁾。

- (1) 核分裂生成物(FP)の崩壊によって放出されるエネルギー(FPの中性子捕獲生成物の崩壊を含む)
- (2) 核燃料核種の中性子反応で生成されたアクチノイド核種の崩壊によって放出されるエネルギー

(3) 原子炉構造材などの中性子反応で生成された放射性核種の崩壊によって放出されるエネルギー

原子炉停止直後から、約10年までは、(1) がとくに重要である。ただし、停止後数十日間では(2)のうち U-239 と Np-239 を考慮する必要がある。また、冷却期間が数十年以上では崩壊熱の主成分は(2)となる。通常の原子炉では、(3)は数%以下。従って、U-235 を燃料とする原子炉の安全審査指針としては、主として(1)を取り、それに U-239 と Np-239 を考慮すればよく、実際にそうになっている。

ここで、崩壊熱データの現状について簡単に見ておこう。まず、崩壊熱の測定には、カロリメータによる直接測定とβ線やγ線などの放射線測定の二つがある。今迄の主な測定は表2のようになる⁽²⁾。一般に、カロリメータ法による結果の方が、放射線測定法より少し大きいようだが、その原因は未だよく分からないらしい。この中で、東大炉 Y A Y O I で測定されたデータは世界で最も信頼されているものの一つである。これはわ

表 2 代表的な崩壊熱測定*

Lott + U-235, Pu-239	カロリメータ
Friesenhahn + U-235, Pu-239	放射線
Yarnell + U-233, U-235, Pu-239	カロリメータ
Dickens + U-235, Pu-239, Pu-241	放射線
Baumung + U-235	カロリメータ
Akiyama + Th-232, U-233, U-235, U-238, Pu-239	放射線
Johanson U-235, U-238	放射線

カロリメータの結果、例えば Yarnell + は、放射線計測法より5～10%大きい。一般にカロリメータの結果が系統的に2～5%大きい。

*加藤、田坂、吉田：近刊予定⁽²⁾

が国の誇りであるが、カロリメータの実験や両者を組み合わせた実験があるとさらに良いと思われる。

さて、次に崩壊熱の計算について見よう。このためには、核分裂生成物 F P の収率、その中性子断面積ならびにその崩壊データが必要である。初期には 100 個程度の F P しか取り上げられていなかったが、その後 A N S 5.1 では約 700 個、わが国の J N D C F P データライブラリーでは実に 1,100 個もの F P を取り上げている。しかし、実際にこのように多数の F P 核種の収率や崩壊データがすべて既知というわけではない。とくにその崩壊データで頭を悩まされた末、早稲田大学の山田勝美教授らが発表した β 崩壊の大局的理論を導入されて、一挙に問題が解決したということである⁽²⁾。これこそが崩壊熱計算を成功に導き、その推奨値提示を可能にしたのである。ただ、ここではその内容の紹介は省略するので、詳しくは文献⁽¹⁾、⁽²⁾ やさらに山田教授の原著論文を参照されたい。

これまでに出版されてきた主な崩壊熱の表式には次のようなものがある。まず第一に、古典的、かつ手計算向きなのは Way-Wigner の式 (1948)、次に原子力熟年組におなじみの Perkins-King の式 (1958) があるが、原子炉の安全審査でよく使われてきたのは A N S 5.1 (1973) とその改訂版 (1979) である。前者はその源に Shure の式 (1961、1972) があり、その名でもよく知られている。また、核燃料施設では ORIGEN 万能のようであるが、新型転換炉 F U G E N でも ORIGEN 79 が使われた。この他、米国 G E 社のものやわが国の三菱原子力 (M A P I) 社のものもあり、ともに指針の中で採用されている。前者は独自の評価に上記のものを加えたものであり、後者は A N S 5.1 (1979) に基づいて作られているが、詳細は文献⁽¹⁾を参照されたい。

最後に、本会の推奨値を改めてまとめておこう。これは計算値であり、以下のような内容を含んでいる⁽¹⁾。

- (1) U-235、Pu-239、U-238、Pu-240、Pu-241、U-233 と Th-232 に対し、表の形式で与えている。
- (2) β 線成分と γ 線成分を別々に示す。
- (3) 照射は、瞬間、1 年および無限時間。
- (4) 冷却時間は $0 \sim 10^{13}$ 秒。
- (5) U-235、Pu-239 および U-238 について、誤差解析。
- (6) F P 核種の中性子捕獲効果を評価。
- (7) アクチノイド核種として、U-239 および Np-239 の崩壊熱を示す。
- (8) 瞬時照射の結果を 33 項の指数関数で近似。

さて、「軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針」の崩壊熱源については、核分裂生成物およびアクチノイドによるものを考慮することとし、実験データとの比較

によって適切な安全余裕を見込まなければならないとしている。そして、解説の中でア
クチノイドについては、U-239 と Np-239 のみ考慮すれば十分とし、付録 I で崩壊熱の
表式として次の三つを与えている。

- (1) ANS 5.1 の与える値に 1.2 を乗じたもの。
- (2) ANSI/ANS 5.1 (1979) に基づいて MAPI 社の作成した崩壊熱曲線。
- (3) GE 社の与える値に、その標準偏差の 3 倍を加えたもの。

さて、今回その付録 III として、下記の項目が追加された。

「崩壊熱の推奨値とその使用法」に与える推奨値に同データブックに与える誤差の 3
倍を加えたもの。

このように、学会推奨値に 3σ を加えるについて、多くの議論を費やし、見方によ
っては保守的すぎると評されるかも知れないが、安全審査指針というものの性格上こう
するのが当然ともいえる。実際に、学会推奨値とそれに 3σ を加えたものを実験値と比
較してみよう。まず U-235 瞬間照射の結果を図 1 に示す。学会推奨値 (AESJ 推奨値)
は東大および ORNL の実験値とよく合い、 3σ を加えると全時間領域で十分に余裕が
ある。それに対し、Pu-239 瞬間照射の結果は図 2 のようになり、学会推奨値は数百秒ま
で東大と ORNL の実験値とよく合うが、それ以後数千秒までは実験値は推奨値を超え、
むしろそれに 3σ を加えた値に一致している。従って、この領域では 3σ を加えること
が必要である。実際には瞬時照射というようなことはなく、より長い時間で積分された
崩壊熱を取り扱うことになるので安全上余裕があるが、やはり Pu-239 のこの時間領域
には問題が残っていると見えよう。この不一致の原因は γ 線成分によるらしく、同じよ
うな傾向は U-235 でさえ見受けられる。

3. 崩壊熱に関する今後の問題

既に多少触れたが、崩壊熱の不確かさを減らし、より正確な基準としてゆくためには、
次のようなことがあると考えられる。

- (1) 実験値間の不一致の原因追求。
- (2) 瞬時照射後 10^3 秒前後で、推奨値が実験値より小さいことがある。これは γ 線
成分で著しい。また Pu-239 で顕著である。これらの原因を調べること。
- (3) 次に、まず Pu-241 のデータが必要である。さらに将来的には、超 Pu 核種の
データが必要で、実験と計算が望まれる。その他トリウムサイクル関連核種の
データも整備すべきである。多くの核種のデータが整うにつれて、その間の関
連性についても調べておくとよい。
- (4) 今回は、軽水炉の ECCS 系の性能評価に学会推奨値の採用が決まったが、推
奨値の精度を向上して、 3σ 加算を減らせるとよい。また、軽水炉の ECCS

以外はもちろん、他のすべての原子炉や核燃料施設の安全審査にも、学会推奨値が使われるようになることが望ましい。

さらに、ここで用いられている種々の核データが他の指針や基準の中にも生かされることを望む。例えば核分裂収率やFP核種の崩壊データなど。

- (5) 個人的な使用経験からして、有限時間照射後の β 線や γ 線のスペクトルが与えられることが望ましい。これは、研究炉や医療炉にとって重要なことだから。

4. 結 言

今回、学会の崩壊熱基準の推奨値が軽水炉の非常用冷却（ECCS）系の性能評価指針に採用された。このことは、関係者が崩壊熱について長年真剣に取り組み、熱心に研究を進め、立派な成果をおさめたことによるが、これを支えるわが国の実験データと理論的研究があったことも特記すべきことである。

この推奨値は、崩壊熱のみならず核分裂生成物の持つ多くの諸量を全体的に示すもので、遅発中性子データとも関連があり、核分裂現象の後半すなわち scission の後の全体像を照らすものとして核分裂物理の上でも意義深い。

将来、この推奨値が諸外国の基準や指針、さらにIAEAを介して国際的な基準や指針にも生かされることを期待したい。

今回のことは、原子力学会の研究成果が原子炉の安全審査の指針に生かされた好例であり、今後同様のことが増えることを強く望むものである。

本稿をまとめるにあたり、文献(1)を大いに参考にさせて頂いた。また、多くの点で、(株)東芝原子力技術研究所の吉田正氏のご教示に依るところが多い。

参考文献

- (1) 「原子炉崩壊熱基準」研究専門委員会：「原子炉崩壊熱とその推奨値」日本原子力学会(1989)。
- (2) 加藤敏郎、田坂完二、吉田正：「崩壊熱研究とデータ標準化の動向」、原子力学会誌、Vol. 35 (No. 1) p. 33 (1993)。

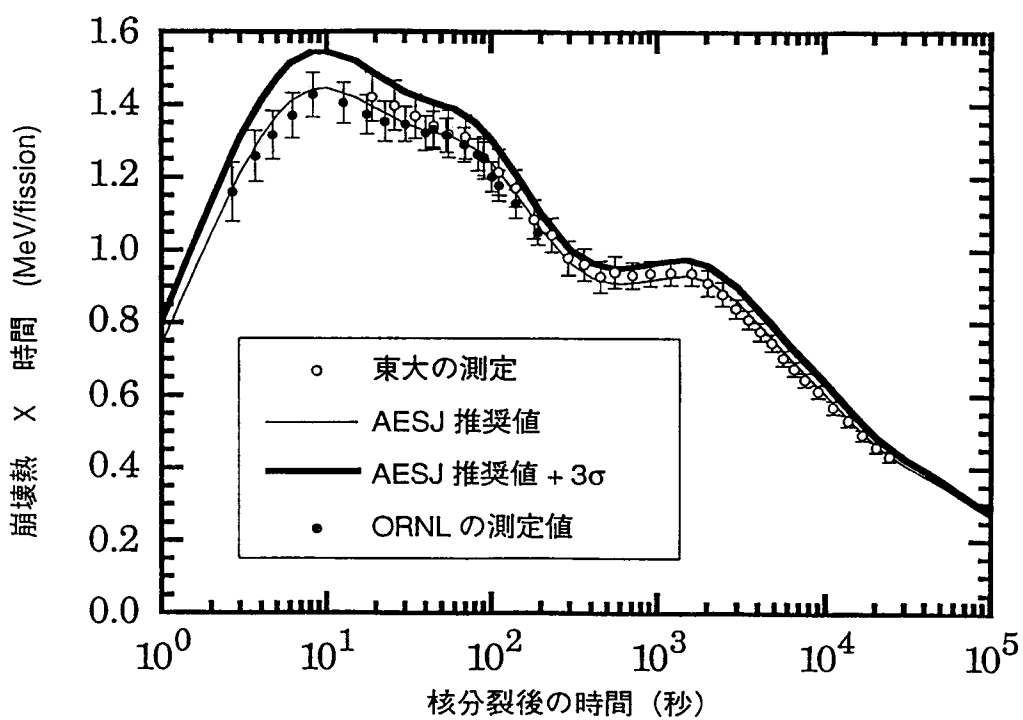


図1 測定との比較 (^{235}U Burst Fission)
($\beta + \gamma$)

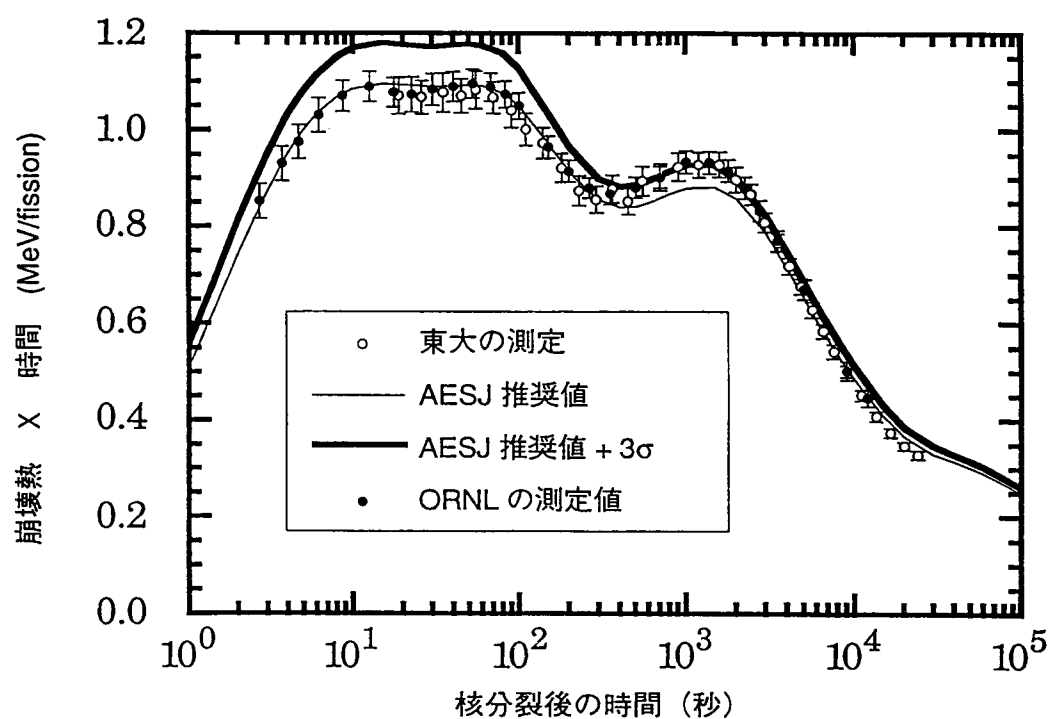


図2 測定との比較 (^{239}Pu Burst Fission)
($\beta + \gamma$)