

## 関電の高浜3・4号機使用済燃料ピットの臨界性に関する見解

### 関電が参考にした米国規格を適用すれば臨界の危険性が存在する

2010年12月13日

グリーン・アクション

美浜・大飯・高浜原発に反対する大阪の会

高浜3・4号機使用済燃料貯蔵ピット(プール)・Aエリアには臨界の危険性が存在する。これが今年11月18日の関電交渉以来、関電や国との議論を経て確認してきた結論である。

六ヶ所再処理工場が行き詰まり使用済燃料を搬出できないこと、及び燃料の高燃焼度化のしわ寄せ・矛盾が、臨界の危険となって現れるまでになってきたのだ。

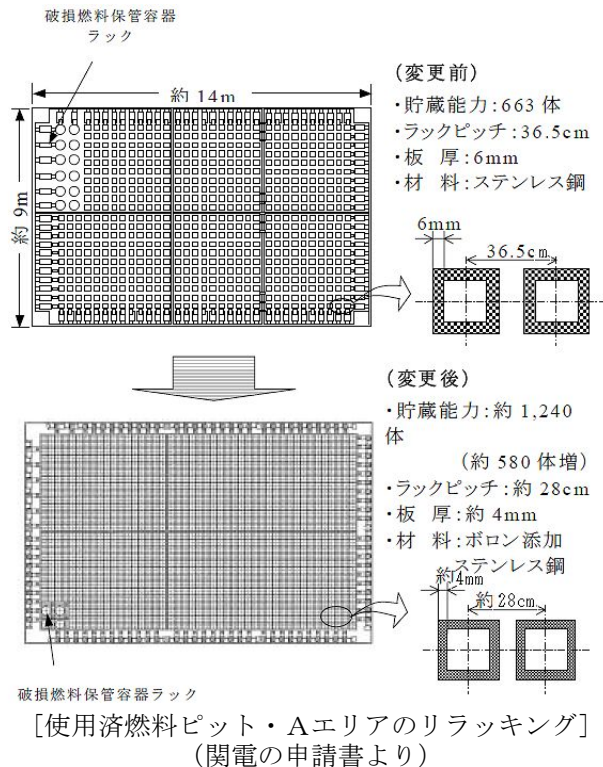
高浜3号機使用済燃料ピットAエリアだけで1240体、3号機炉心内157体の約8倍の使用済燃料が貯蔵可能である。そこは格納容器の外に位置するため、臨界事故が起これば放射能(揮発性のルテニウムやセシウムなど)が外部に容易に放出されることになる。臨界事故は決して起こしてはならない。

しかも、そのように危険な貯蔵ピットに、高浜3・4号機プルサーマルによる使用済MOX燃料をほぼ永久に貯蔵することになるのだから、大きな危険が現在ばかりか将来の子孫にまで及ぶことになる。プルサーマルを始めてはならない。

以下で登場する中性子実効増倍率とは、核分裂に実際に寄与する中性子数の時間的増減を示す指標である。核分裂連鎖反応が世代を追って進むとき、ある世代の中性子数をその一つ前の世代の中性子数で割った値であり、通常 $k$ で表す。 $k=1$ のとき、中性子数は増減なく一定となり、そのときを臨界と呼ぶ。 $k>1$ となれば核暴走になる。 $k$ の基準値は、安全余裕や不確定性を考慮した1より小さい値に設定される。

#### 1. 高浜3・4号機使用済燃料ピットでの中性子増倍率の増加

高浜3・4号機の使用済燃料ピット・Aエリアは、2003年7月にリラッキング申請が、2004年1月に許可がだされて「稠密化」(ぎゅうぎゅう詰め)の措置がとられた。ラック中心間距離が36.5cmから28cmへ、ラック厚みが6mmから4mmへと縮められ、その結果貯蔵体数が663体から1240体へと1.9倍に増やされた。ラックには中性子吸収剤であるほう素(ボロン)入りステンレス鋼が使われて臨界を防ぐ措置がとられたが、それでも中性子増倍率は増加した。このよ

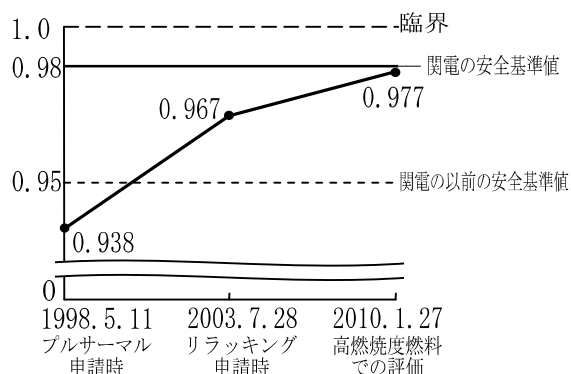


うな稠密化措置をとったのは、「使用済燃料搬出量が当初見込みより減少したため」とされている。すなわち、六ヶ所再処理が予定より大幅に遅れたことの影響がきたのである。

その後、さらに高浜1・2号機燃料の高燃焼度化の影響を受けて中性子増倍率が增大した。高浜3・4号機使用済燃料ピットは1・2号機用にも共用化されており、高燃焼度化によって燃える(核分裂性)ウランをより多く含んだ使用済燃料が上記Aエリアにも貯蔵されるためである。

このような経過を経て、中性子実効増倍率は右図に見られるように増加し、関電が甘く定めた基準値0.98と比較してさえ、その差はわずか0.3%にまで接近した。このような異常な状態にこの貯蔵ピットはおかれているのである。

そして、実際には関電の臨界性評価方式は根拠が明確でなく、関電が参考にしたという米国原子力学会の規格に忠実に従えば、臨界となる危険性が存在することを以下で示す。



高浜3・4号機使用済燃料貯蔵ピットAエリアに関する関電の中性子増倍率評価値と基準値

## 2. 関電の評価方式

高浜3・4号機ピットについて関電がどのような評価を行ったかは、原子力安全・保安院が作成して原子力安全委員会に提出した2010年1月の資料「コメント回答(その2)」が示している。この資料は、これまで安全基準として厳しい側の0.95をとってきたのに、なぜ甘い基準0.98をとることにしたのか、そのようにしても許される根拠は何かに関するコメントである。その最後(7-3頁)に、0.98という基準について、「本基準は、米国ANSI/ANS-57.2の基準を参考として定められたものであり、 $\leq 0.95 \sim 0.98$ とすることが許容されているが、0.95より大きい値を採用する場合は、解析上の不確定性を詳細に評価することが求められている」と書かれている。

では、この中に書かれている「定められたものであり」とはいったい誰によって定められたのが問題になる。この点、11月29日に福島瑞穂参議院議員へのレクで保安院・審査課が説明したところによると、それを定めたのは関電であるとのことだった。では、九電の場合の基準は九電が定めたことになるのかと質問すると、そのとおりですと、審査課は臆面もなく答えた。審査されるものが審査の基準を決めているのである。

その関電方式は、コメント回答の2つの表によって端的に表されている。高浜3・4号機ピットAエリアに即して見ると、その内容は以下のようになっている。

- ① 中性子実効増倍率の評価値は0.977で基準値は0.98であり、 $0.977 \leq 0.98$ となっている(表1の下から2行目)。
- ② 評価値0.977には不確定性0.020を含む(表1の注※1)。この不確定性を除いた値 $0.977 - 0.020 = 0.957$ には不確定性は含まれていないと関電は認めた。

表1 燃料貯蔵設備の未臨界性の評価結果

	実効増倍率	
	純水冠水条件	評価基準
1号及び2号炉 新燃料貯蔵庫	0.938 <sup>※1</sup>	$\leq 0.95$
1号及び2号炉 使用済燃料ピット	0.973 <sup>※1</sup>	$\leq 0.98$
3号及び4号炉 使用済燃料ピット(Aエリア)	<u>0.977<sup>※1</sup></u>	<u><math>\leq 0.98</math></u>
3号及び4号炉 使用済燃料ピット(Bエリア)	0.948 <sup>※2</sup>	$\leq 0.98$

※1: 不確定性0.020を含む

※2: 不確定性0.025を含む

(「コメント回答(その2)」  
原子力安全・保安院 2010. 1)

③ その不確定性 0.020 は表2の真ん中の列（Aエリア）の最下行にある設計に用いる不確定性  $\varepsilon = 0.020$  から来ている。その値は、下から2行目にある不確定性合計の値0.0174を小数点以下3桁目を安全側に切り上げて得られている。

④ その不確定性合計は単なる合計ではなく、表2の下に書かれている\*1)の式によって計算されている。その計算では、表2中の次のような不確定性が用いられている。

(a) 臨界実験から決まる増倍率平均値の誤差(1との差)  $\delta k$

$$\delta k = 0.0000$$

と定められている。

このことは同時に、平均値を

$$k = 1$$

と定めたことを意味している。

(b) 臨界実験（101個）のばらつき

から 95%信頼度・95%確率で決めた不確定性  $\varepsilon_c = 0.0156$ 。

(c) 使用済燃料ピット内のラック等、製作に関わる不確定性（4つ）  $\varepsilon_p \sim \varepsilon_r$

⑤ これらとは別に、基準値を決めているが、それは次のように決めたことを関電に確認した。  
基準値 =  $1 - 0.020$  (安全余裕) = 0.98

ここで安全余裕を以前には大きく 0.050 ととり、基準値 =  $1 - 0.050 = 0.950$  としていたが、それを切り縮めている。そのようにしてもよい根拠として、表2で新たに④燃料製作公差を考慮したことなどを挙げているが、その値はわずか 0.0031 しかない。このような理由で安全余裕を切り縮めることはとても納得できることではない。もし以前どおり基準を 0.950 ととれば、評価値 0.977 はこれを超えてしまうことになる。このような事情こそが安全余裕を切り縮めた真の理由ではないだろうか。また、米国の基準に照らせば、考慮すべき不確定性は他にもあるのではないかとも思われる。

しかしここでは、このような安全余裕の取り方を認め、関電が採用した表2の数値をすべてそのまま認めることを前提としよう。これらの数値は安全審査にかけられたものである。その同じ数値体系を前提としても、関電が参考にしたという米国規格に立てば、実は臨界の危険が存在することを以下で示す。

### 3. 関電が参考にした米国の規格 ANSI/ANS-57.2 を適用すれば不合格となる

上記コメント回答では、基準値を 0.98 にした際の参考として米国の ANSI/ANS-57.2 を挙げている。また、関電のこの問題に関する申請書でもその同じ文献を挙げている。そのため、ANSI/ANS-57.2 ではどのような評価をしているか、まず確認しておこう。

ANSI/ANS-57.2 では、「燃料貯蔵ラック内の燃料の評価された最大増倍率」  $k_s$  が、基準値である「最大許容増倍率」  $k_a$  以下であることが安全判断の基準となっている。すなわち、

表2 不確定性計算結果

(1号炉、2号炉、3号炉及び4号炉 使用済燃料ピット)

項目	不確定性		
	1, 2号炉	3, 4号炉	
		Aエリア	Bエリア
臨界計算上の不確定性	(平均値は 1.0022 となるので保守的に 0.0000 とする。)		
平均誤差 $\delta k$	0.0000		
95%信頼度-95%確率 $\varepsilon_c$	0.0156		
製作に関わる不確定性*2			
①ラック間隔公差 $\varepsilon_p$	0.0029	0.0029	0.0129
②ラック内辺公差 $\varepsilon_w$	0.0012	0.0064	0.0052
③ラック内偏心 $\varepsilon_f$	0.0016	0.0009	0.0009
④燃料製作公差 $\varepsilon_r$	0.0025	0.0031	0.0031
不確定性合計*1 $\varepsilon$	0.0162	0.0174	0.0211
設計に用いる不確定性 $\varepsilon$	0.020	0.020	0.025

$$*1) \varepsilon = \delta k + \sqrt{\varepsilon_c^2 + \varepsilon_p^2 + \varepsilon_w^2 + \varepsilon_f^2 + \varepsilon_r^2}$$

\*2) ラック及び燃料製作に係る公差の設定が違うことによりピット毎の不確定性が異なる。なお、3,4号炉使用済燃料ピットのラック間隔公差についてはAエリアの使用済燃料貯蔵設備の貯蔵能力変更を図った際にラック間隔公差の考え方を変更しており、Aエリアの公差はBエリアの公差よりも小さな値となっている。

(「コメント回答(その2)」  
原子力安全・保安院 2010.1)

$$k_s \leq k_a$$

ここで、 $k_s$  は貯蔵ピットに関する増倍率で、計算技術上の統計的不確定性をすべて含むとされている。他方、 $k_a$  は臨界実験から決まる増倍率で、臨界実験とその評価上の不確定性や安全余裕を含んでいて、次のように定義されている。

$$k_a = k_c - \Delta k_u - \Delta k_m$$

ここで、 $k_c$  は臨界実験に関する増倍率の平均値で関電はこれを  $k_c = 1$  としている。 $\Delta k_m$  は安全余裕で、関電はこれを  $\Delta k_m = 0.020$  ととっている。 $\Delta k_u$  は臨界実験に関する不確定性から 95%信頼度・95%確率できめる値で、コメント回答が引用している 101 個の実験の場合は、次の式で決めている。

$$\Delta k_u = 1.925 \times 101 \text{ 個実験の標準偏差 } (0.0081) = 0.0156$$

つまり、これは表 2 の中に登場する  $\epsilon_c$  と同じ量である。

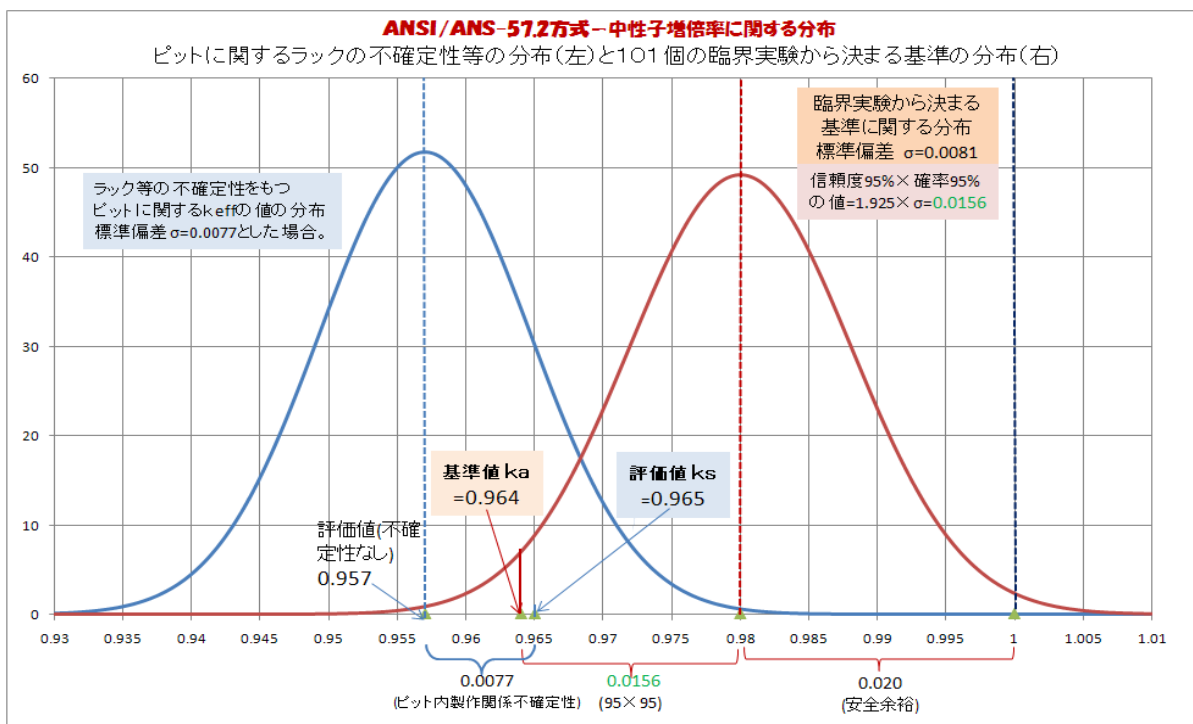
このようにして右辺の基準  $k_a$  は、臨界実験に関する量と安全余裕から決まり、関電の数値を用いると次のように決まる(小数点以下 4 桁目を四捨五入する)。

$$\text{基準値 } k_a = 1.000 - 0.016 - 0.020 = 0.964$$

他方、左辺の  $k_s$  は、貯蔵ピットの中性子増倍率であり、関電の数値では次のようになる。関電の評価値 0.977 のうち 0.020 は不確定性でそれを除いた値は 0.957 であった。また、不確定性 0.020 の中には臨界実験に関する不確定性  $\epsilon_c = 0.0156$  が含まれていたが、ANSI/ANS ではこれは基準値で考慮されている。そこで、不確定性としては表 2 の製作に関わる不確定性だけを考慮する必要がある。それは表 2 下の注の式で、 $\epsilon_c$  と  $\delta k$  を取り除いた式で決まり、値は 0.008 となる (0.0077 の最後の桁を四捨五入した)。結局評価値は次のようになる。

$$\text{評価値 } k_s = 0.957 + 0.008 = 0.965$$

その結果、評価値が基準値を上回り、臨界が起こらないという安全性は成り立たない。すなわち、関電が参考にしたという米国の規格をそのまま適用すれば、高浜原発の貯蔵プールの申請は不合格となる。これらの様子は下記グラフで示すことができる。右の山が臨界実験の様子を示し、左の山は貯蔵ピットに関し、製作に関わる不確定性を仮にそのまま標準偏差とした場合の分布を示している。



#### 4. 関電評価方式の批判

このような結果になることを我々は福井県に伝えた結果、福井県から関電に関電評価方式の根拠となる資料を示すよとの意思が伝えられた。また、国に質問書を出したところ、その回答が福島瑞穂議員へのレクという形で説明されたが、やはり関電方式の根拠となる資料を示すよう、福島議員から保安院審査課に要請された。その結果、その根拠となる資料なるものが、関電からは12月2日に、国からは12月3日に送られてきたが、それらは両方とも同じで下記枠囲いに示す誤差伝播式を書いたものであった(保安院審査課からは別に ANSI/ANS-8.17-2004 の抜粋が付加されていたが、それは安全評価には用いていないことを確認した)。その誤差伝播式をいま問題にしている題材に具体的にどのように適用したのかは何も書かれていなかった。[関電回答7頁]

Zが互いに独立なn個の確率変数  $X_1, X_2, \dots, X_n$  の関数  $f(X_1, X_2, \dots, X_n)$  であるとき、 $X_1, X_2, \dots, X_n$  の分散を  $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2$  とし、Zの分散を  $\sigma_0^2$  とすると、下記関係が成り立つ。

$$\sigma_0^2 = \left(\frac{\delta f}{\delta X_1}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta X_2}\right)^2 \sigma_2^2 + \dots + \left(\frac{\delta f}{\delta X_n}\right)^2 \sigma_n^2$$

そこで我々は関電に説明を求め、その説明会が12月9日に関電本店内で行われた。その結果、次のような点が再確認された。

- (1) 上記枠囲い内の誤差伝播式( $\sigma_0^2$ の式)は、いまの臨界問題では前記表2の注釈\*1)の式で  $\delta k=0$  として両辺を2乗した式、すなわち、 $\varepsilon^2 = \varepsilon_c^2 + (\varepsilon_p^2 + \varepsilon_w^2 + \varepsilon_f^2 + \varepsilon_r^2)$  に相当する。
- (2) 誤差伝播式には、ランダムに変化する変数(確率変数)  $X_1, \dots, X_n$  と、それらから決まる関数  $f(X_1, \dots, X_n)$  が登場している。他方、関電方式の結果である上記(1)の  $\varepsilon$  の中には、臨界実験に関する量  $\varepsilon_c$  と貯蔵ピットに関する量( $\varepsilon_p$  など)の両方が入っている。そうすると関数  $f$  の中に両方の変数が入っているはずだが、そのような  $f$  は何かと質問した。しかし関電は、 $f$  が何かはまったく答えられなかった。
- (3) 関電は ANSI/ANS の通りにしないとイケないことはないという。ANSI/ANS では右辺に出ている不確定性の  $\Delta k_u$  を左辺に移しても不等式は成り立つのだからいいのだという。ところが、 $\Delta k_u$  は確率変数ではなく、95-95方式で決められた確定値なのである。他方、誤差伝播式では確率変数がベースになっている。それゆえ、誤差伝播式をどのような考え方に立って適用したのが誰にも分かるように説明されなければならない。そうでないと根拠を示したことになる。
- (4) とりわけ端的に疑問として浮かぶのは、臨界実験に関する不確定性  $\varepsilon_c$  の扱いである。誤差の伝播論では、前頁グラフにある右側の山が示す分布に従う確率変数を扱うことになる。そうすると最後に不確定性として出てくるのはその山の標準偏差のはずだが、 $\varepsilon_c$  は標準偏差そのものではなくそれから95-95の操作で導いた値である。そのような操作が誤差伝播論のどこから出てくるのかと質問したが、まったく答えられなかった。
- (5) 結果的に両方式による計算結果の差異は、不確定性分が ANSI/ANS では  $0.016+0.008=0.024$  となるべき数値を、関電方式では  $\sqrt{(0.016^2+0.008^2)}=0.018$  という小さい値で置き換えたことから来ている。すなわち、三平方の定理を思い出すと、直角を挟む2辺の和を他の斜辺の長さで置き換えたことになっている。この事実は関電も実にすんなりと認めたので、この違いは合意したものとなった。それだけ関電方式では ANSI/ANS より非安全側に評価したことになる。この言葉の意味するままでは関電は認めようとしなかったが、これは否定しようのない事実である。

## 5. 結論

関電方式では、第一に、安全余裕をそれまで0.050ととっていたのを0.020に大幅に切り縮めた。第二に、ANSI/ANS方式では臨界実験の量から基準値を決め、貯蔵ピットの量から評価値を決めて比較していたのを、両者をごちゃ混ぜにして誤差伝播論を単に形式的に適用し、不確定性を低く評価した。このようなごまかしによって余裕わずか0.3%で合格にしたのである。

米国規格を適用すれば、高浜原発の貯蔵ピットは安全審査に用いられた数値のままでも不合格になること、他方の関電方式には明確な根拠がないこと、この重要な事実が12月9日の関電説明の場で再確認されたのである。

### 参考資料：11月18日関電交渉からの経過

- ・ 11月18日（木）関電交渉：事実上、ANSI/ANSのとおりであれば不等号が逆転することになるという内容が確認された。ただし、その場で直接そのことを確かめたのではなく、その場で関電が述べたことを適用すればそうなるということ。その事実は交渉から帰った夜に認識した。
- ・ 11月20日（土）：福井県と福井県安全専門委員会に宛てて要望書を送付。その内容及び添付の説明資料によって、関電交渉で確認した内容を説明提起。
- ・ 11月25日（木）：福井県に出かけて趣旨を説明した結果、福井県は関電に対して関電方式の根拠の説明資料を提出するよう伝えるということになった。その関電回答は県の安全専門委員に渡し、美浜の会とグリーン・アクションには関電から直接渡すように言うことになった。
- ・ 11月26日（金）：高浜町総務課長と会った結果、町は国に問い合わせることになった。
- ・ 11月26日（金）：保安院に対して質問書を提出。
- ・ 11月29日（月）：福島瑞穂議員レクという形で保安院から質問書への回答を受けた。関電方式を保安院はそのまま認めたことが明らかになった。福島議員は関電方式の根拠となる資料を保安院が提出するよう要求し、保安院はこれを了承した。
- ・ 11月30日（火）：保安院レクでの回答結果をもって、福井県と高浜町に新たな要望書を提出しにでかけた。
- ・ 11月30日（火）：関電の要請に応じて、何を提出要求しているのかの質問書を関電に提出。
- ・ 12月2日（木）夜：関電からFAXで回答が来たが、1枚のA4用紙に誤差伝播式が書かれただけのものだった〔7頁参照〕。
- ・ 12月3日（金）：保安院審査課から福島議員事務所に誤差伝播式とANSI/ANS-8.17の抜粋を書いただけの用紙が送られてきた。ANSI/ANS-8.17の抜粋については福島事務所からの問い合わせの結果、それは安全審査に用いられてはいないことが12月7日に確認された。
- ・ 12月6日（月）：福井県と福井県安全専門委員会に再要望書を提出し、関電回答を批判した。
- ・ 12月9日（水）：関電本店にて、関電回答の説明を受け、議論した。

資料の提出について

不確定性の評価にかかる根拠となる資料は以下のとおりです。

1. 互いに独立な不確定性は、統計の考え方から、誤差の合成式により合成できます。

独立な確率変数の誤差の合成に関する評価式  $\varepsilon = \sqrt{\sum_i \varepsilon_i^2}$  は誤差伝播の法則として一般的なものですが、参考文献「次元解析・最小2乗法と実験式（コロナ社）」より関連箇所を要約して示します。

Zが互いに独立なn個の確率変数 $X_1, X_2, \dots, X_n$ の関数 $f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ であるとき、 $X_1, X_2, \dots, X_n$ の分散を $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2$ とし、Zの分散を $\sigma_0^2$ とすると、下記関係が成り立つ。

$$\sigma_0^2 = \left(\frac{\delta f}{\delta X_1}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta X_2}\right)^2 \sigma_2^2 + \dots + \left(\frac{\delta f}{\delta X_n}\right)^2 \sigma_n^2$$

2. 各不確定性評価の項目の独立性について

以下の不確定性項目については、互いに独立です。

- (1) 臨界計算（臨界実験ベンチマーク）上の不確定性
- (2) 製作公差及びラック内での燃料集合体の偏心による不確定性
  - ① ラック間隔
  - ② ラック辺
  - ③ ラック内での燃料集合体の偏心
  - ④ 燃料集合体（燃料ペレット直径、密度、被覆管内径、外径、集合体外寸）

製作公差による不確定性は製造過程から、偏心による不確定性はその成り立ちから互いに独立です。また、不確定性は基準寸法（偏心については基準位置）と公差（最大偏心位置）の評価結果の差として求めていることから臨界計算の不確定性は除かれるため、これらの不確定性は臨界計算の不確定性とは独立です。