

## 福島第一原子力発電所 2号機におけるキセノン濃度についての評価

原子力システム安全部

## 1. 目的

平成 23 年 11 月 2 日に、当該機の格納容器ガスからキセノン 133,135 が検出されたのを契機として、再臨界の可能性についての議論が活発となった。東電は、自発核分裂によるキセノン発生量を評価した結果、評価値が測定値とほぼ合致していたことを根拠として、原子炉は未臨界にあること、キセノンの発生は自発核分裂が原因であること等の結論に至り、11 月 4 日付けの報告書で結果を公開した。

当部においては、当該報告書の妥当性を確認するべく追解析を実施してきたが、解析条件に多くの相違点があること、さらに自発核分裂で発生した中性子が燃料で再度核分裂を起こす現象（二次核分裂）を考慮していないこと等が明らかとなった。

本報告は、キセノン濃度評価の結果を東電報告書と対比する形でまとめると共に、キセノン発生源の大部分が二次核分裂であるという結論に至った根拠を示したものである。

## 2. 東電との解析条件の相違について

解析条件の相違が著しいものの比較を表 1 に示す。

表 1 格納容器内キセノン濃度解析条件の相違点比較

解析条件	東電	JNES	キセノン濃度への影響 (JNES / 東電)
(1)Cm 量評価 (添付 3.1*)	平均燃焼度で計算	4 バッチ燃料交換を考慮して計算	3-7 倍
(2)Cm の自発核分裂による Xe の収率 (添付 3.2, 3.3)	中性子による核分裂に対する独立収率を使用している可能性大	自発核分裂の収率を使用、I からの崩壊による生成分を考慮。	4-9 倍**
(3)格納容器雰囲気内濃度 (ガス放出率) (添付 3.5)	100%と仮定	0.6%と仮定	1/170 倍
(4)二次核分裂の影響 (添付 3.7)	考慮せず	考慮	約 10 倍(k=0.9 の時)

\*添付資料（詳細版）の 3.1 章に記載（以下、同様）。

\*\* 評価法が異なり、直接比較できないことから、Xe インベントリの比 27 倍から逆算。

3. 計算条件および結果  
(添付資料に記載)

4. 結論

本検討で得られた主な結論を以下に示す。

- ・デブリからのキセノンガスの放出率は、キセノン濃度の結果に大きな影響を及ぼす。東電の解析条件（ガス放出率 100%）は、炉内・外試験等を通じて得られた知見とは著しく乖離している。
- ・上記の理由により、ガス放出率を現実に近い値（約 0.6%）に設定すると、二次核分裂の効果を加えなければガス濃度測定値が説明不能である。
- ・ガス濃度測定値から当該炉の臨界状態を逆算すると、実効増倍率は 0.93 程度となり（図 1）、キセノン発生源の 90%以上が二次核分裂であると推定される。

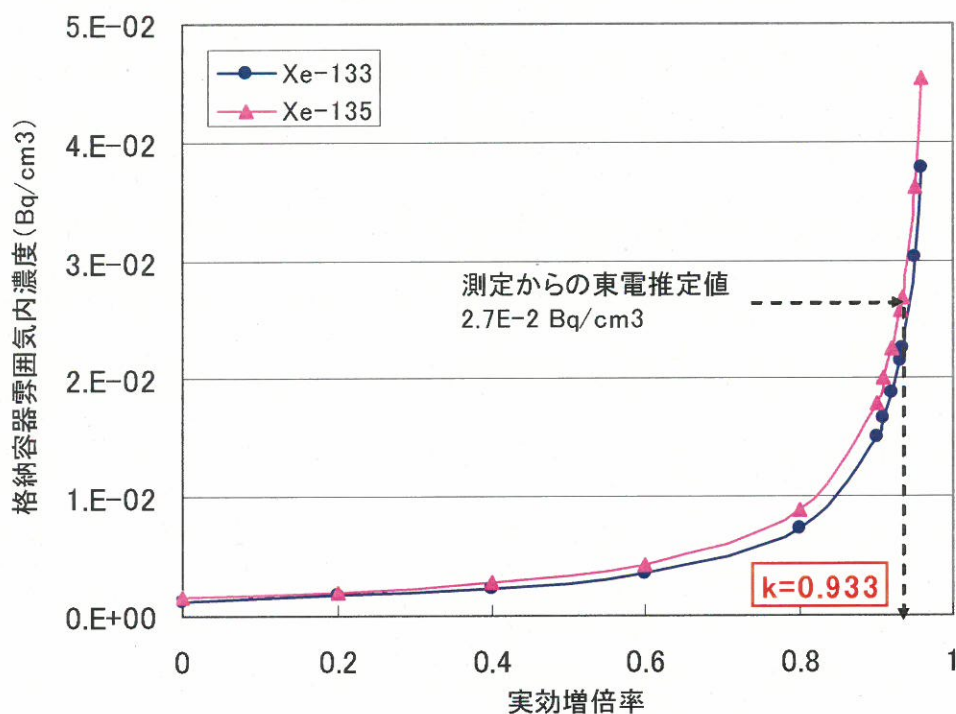


図 1 キセノン濃度測定値による実効増倍率の推定

以 上

福島第一原子力発電所 2 号機におけるキセノン濃度についての評価（詳細結果）

原子力システム安全部

1. 概要

当該機においては、原子炉格納容器ガス管理システムが整備され、平成 23 年 11 月 1 日よりキセノン濃度の測定値が非定期的に公表されている。この測定データは、原子炉内の状態が不明である現状においては、原子炉の未臨界状態の把握と、万が一再臨界が発生した場合のすみやかな検知という観点から、有効な手がかりとなりうる唯一の情報であり、積極的に活用することにより当該炉の監視に有益な情報を抽出できることが期待される。本報告はこの一環として、キセノン濃度測定値から臨界状態の推定を試みた結果をまとめたものである。

2. キセノン濃度測定データの時間推移

東京電力のホームページに掲載されているプレス発表資料より、該当するデータを抜き出して経過日数の形で整理したものを図 1 に示す。なお、検出限界未満と発表されたデータは除外した。

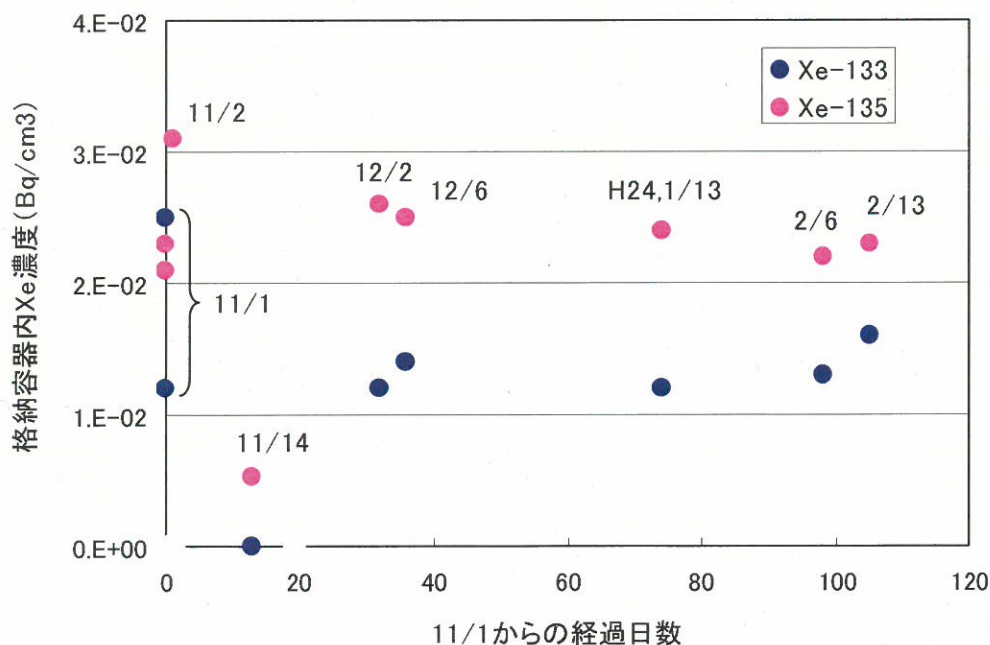


図 1 2 号機格納容器雰囲気中キセノン濃度測定値の時間推移

運用開始直後の 11/1-2 の測定値は、短時間を置いて複数回測定された結果にも関わらず、特に Xe-133 の再現性が悪いことがわかる。また、11/14 のデータは他の測定値の傾向から外れて、大幅な過小評価となっている。その後、12/2 以降は測定値が安定し、Xe-133 は  $1.2\text{-}1.4 \times 10^{-2}$  Bq/cm<sup>3</sup>, Xe-135 は  $2.4\text{-}2.6 \times 10^{-2}$  Bq/cm<sup>3</sup> で、ほぼ一定になっている。11/1 にはホウ素注入が実施され、炉心の未臨界度が一時的に増大したと考えられる。付録 1 に示すように、ホウ素注入によるキセノン発生量減少の影響がサンプリングガス濃度に現れるまでに 2-3 日を要するため、11/2 の時点では測定値に反映されなかったと解釈できる。現在の 2 号機への注水量は 10m<sup>3</sup>/hr 程度であるが、原子炉内の滞留水の体積を約 20m<sup>3</sup> と見積もると、数時間でホウ素濃度は半分に低下し、一日後にはほぼ元の淡水に戻ると推測される。11/14 の測定値が異常に低い理由を、11/1 のホウ素注入によるキセノン発生量減少に関連づける仮説もありうるが、上記の理由により 2 週間にわたってホウ素濃度が高く保たれる可能性はないことを考慮するとその信憑性は低いと判断せざるをえない。よって、11/14 の測定値の真正性には大いに疑問があり、本評価においては検討対象から除外した。

### 3. キセノン濃度の絶対量評価による臨界性推測

前章でも示したように、11/14 までの測定結果を除けば、比較的最近の濃度測定値は安定しており、その測定精度は高いと推測される。このため、炉内の中性子源強度とキセノン発生量の関係から、2 号機の臨界性を逆算することを試みる。同様の評価は東京電力でも行われ、11/4 に報告書が公開されたが、解析条件設定に多くの差異があり、結論が大きく異なることが判明したため、本報告書においてはまず解析条件を東電評価と対比する形で併記し、差異の理由についての説明を加えた。

#### 3. 1 Cm 量評価

計算には ORIGEN-2 (JENDL-3.3) を使用し、2 号機の標準的な燃料交換パターンを模擬した燃焼計算を行い、炉内に蓄積した Cm 量および自発核分裂量を算出した。11 月 1 日現在の 2 号機燃料中の自発核分裂量は、

Cm-242 毎秒 2.36E+9 回 (東電評価値 : 8.3E+8 回)

Cm-244 毎秒 5.11E+9 回 (同上 : 7.4E+8 回)

となった。本評価値が東電よりも約 3~7 倍大きくなっている理由は、本評価が 4 バッチ燃料交換を考慮して、高燃焼度燃料で Cm の生成量が急増することを考慮した計算になっているのに対し、東電は平均燃焼度を用いているために同効果が考慮されていないためと推定される。

なお、Cm 酸化物は 1600℃以上で Cm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> という科学形態を取り、その融点が 2265±20℃、沸点が 3700±200℃とされることから、ウランやプルトニウム酸化物と同様に大部分が炉内に貯留し、炉心溶融による炉外への漏出分については考慮不要と考えられる。

### 3. 2 Cmの自発核分裂によるXeの収率

Xeの収率は、最新の核データライブラリであるJENDL-4.0ベースの評価値になるよう努めた。ORIGEN-2では、Cmの自発核分裂収率を使えないので、JENDL-3.3ベースの中性子による核分裂の収率を代用して得られた結果に以下の補正係数を掛けた。また、Cm-242の収率はJENDL-4.0に収録されていないのでCm-244で代用した。表1にJENDL-4.0のXe収率を示す。

表1 JENDL-4.0に収録されているXeの収率\*

Cm-244核分裂	Xe-133		Xe-135	
	独立収率	累積収率	独立収率	累積収率
熱中子による核分裂	0.011%	3.984%	0.3211%	5.642%
自発核分裂	0.005%	5.661%	0.281%	7.473%
参考値： WIMS-D	-----	-----	1.22%*	-----

\* 東電が評価に使用したデータ (<http://www-nds.iaea.org/wimsd/fpyield.htm#T5>) には、WIMS-D ライブラリを引用したもので、引用先には独立収率か累積収率かの記載はないが、U-235等のデータ比較から独立収率であると推定した (WIMS-Dの収率：0.2576%に対して、JENDL-4.0は独立収率：0.312%、累積収率：6.539%で独立収率に近い)。

Xe-133 累積収率：

5.280% (中性子による核分裂の場合、JENDL-3.3の平均値)

5.661% (Cm-244の自発核分裂、JENDL-4.0) (東電評価値：なし)

補正係数は、 $5.661 / 5.280 = 1.072$

Xe-135 累積収率：

5.869% (中性子による核分裂の場合、JENDL-3.3の平均値)

7.473% (Cm-244の自発核分裂、JENDL-4.0) (東電評価値：1.22%)

補正係数は、 $7.473 / 5.869 = 1.273$

東電評価値によるXe-135の生成速度は、Cm-242からの収率2.66%とCm-244からの収率1.22%を合算した毎秒 $3.1E7$ 個としている。この処理については、2つの点で不適切である可能性がある。

- ・自発核分裂の収率ではなく、中性子による核分裂の収率を使用している。
- ・累積収率ではなく独立収率を使用している可能性が高い (次節3.3参照)

### 3. 3 Xe と I の放射平衡の扱い

東電の評価では下式が使用されている。

$$\text{毎秒の Xe135 生成量} = \lambda N + 14N / (3000 \times 3600)$$

ただし、 $\lambda$ : Xe135 の崩壊定数 (2.12E-5)

N: 格納容器内の Xe135 の原子数

$$3.1E7 = 2.12E-5 N + 1.3E-6 N$$

$$N = 1.4E12 \text{ 個}$$

上式の左辺は、3.2 節で計算された Xe 発生量が当てはめられており、独立収率を使用して計算したとすれば、I の崩壊による発生分が考慮されていない。東電が使用した WIMS-D のデータによれば、I-135 の独立収率は、Cm-242 が 3.89%、Cm-244 が 4.42% であり、I-135 が半減期約 6.6 時間で崩壊し、格納容器内でほぼ全量が Xe-135 になることから、生成量として合算しなければならない。合算後の収率は以下の通りとなり、表 1 の累積収率に近い値となる。

$$\text{Cm-242 の収率} \quad 2.66 + 3.89 = 6.55 \% \text{ (WIMS-D)}$$

$$\text{Cm-244 の収率} \quad 1.22 + 4.42 = \underline{5.64 \%} \text{ (WIMS-D, JENDL-4.0 累積収率は } \underline{5.642\%})$$

なお、東電評価式の右辺は、第 1 が Xe の崩壊、第 2 項が格納容器のガス流出による消失速度を示しており、左辺の発生量とのバランスから格納容器内の Xe 原子の個数を計算している。

他方、本評価では自発核分裂数を出力に換算し、その時間推移（主に Cm-242 の崩壊）を考慮して I および Xe の生成量を、ORIGEN-2 コードを用いて評価している（図 2）。この際、I から Xe への崩壊の効果は、放射平衡も含めて数値計算の形で自動的に考慮される。なお、東電評価式の右辺第 2 項に相当するガス流出効果については、右辺第 1 項の約 5%程度と影響が小さいことから考慮しなかった。

### 3. 4 Xe インベントリ

2 号機の燃料中に自発核分裂で発生した Xe インベントリは以下の通りとなった。

Xe-133 放射能量 6.70E+8 Bq (東電評価値：報告なし)

Xe-135 放射能量 8.00E+8 Bq (東電評価値：3.1+7、濃度から逆算したもの)

本評価は、東電評価値の 27 倍となった。この原因は、上記 3.1 (Cm 量評価)、3.2 (Xe 収率) の両方で東電評価値が本評価よりも過小評価となるような条件を用いているからである。

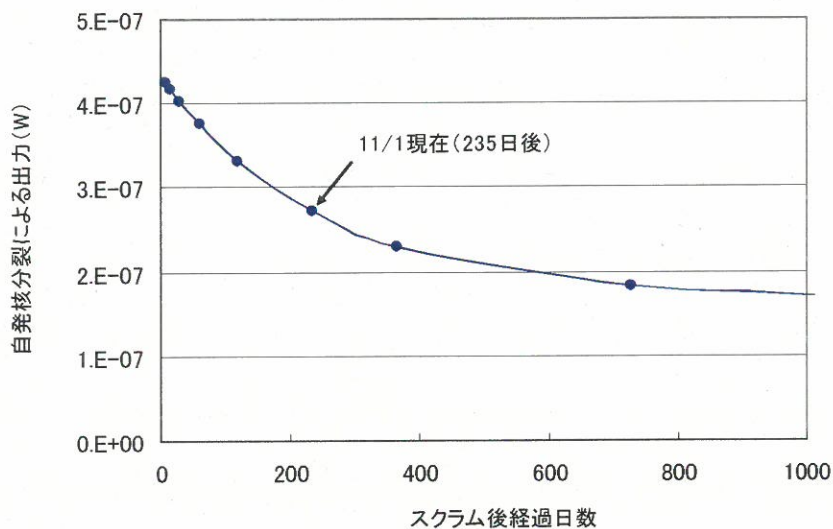


図 2 自発核分裂による出力の時間推移

### 3. 5 格納容器雰囲気内濃度

燃料中に生成した Xe は大部分が燃料中に留まり、その放出率は BWR 燃料の場合、燃料が高温状態にある運転中でも 20%を超えないとされている。燃料ペレットからの FP ガスの放出は、付録 2 に示すように、(1)拡散による放出、(2)リコイル (反跳) による放出、(3)ノックアウト (はじき出し) による放出の 3 つの要因によって起こるが、2 号機の燃料の現在の温度は 100°C 程度と低いため、(1)の拡散による放出は極めて小さく、(2)および(3)によって燃料の表層部で発生した Xe のみがデブリから放出されと考えられる。燃料デブリ半径を 5mm、表層部厚さを 10 ミクロンと仮定すると、ガス放出率は 0.6%になる。ただし、この放出率は暫定値であり、燃料の粒径分布によっても異なるため、その不確かさ幅は大きいと推測される (付録 3)。

このガス放出率を用いて格納容器雰囲気内濃度を計算した結果は以下の通りとなった。

Xe-133 濃度 1.34E-3 Bq/cm<sup>3</sup> (東電評価値：報告なし)

Xe-135 濃度 1.60E-3 Bq/cm<sup>3</sup> (東電評価値：9.9E-3 Bq/cm<sup>3</sup>)

本評価は、東電評価値の 1/6 倍となった。東電評価では、生成した Xe が全量放出されるという仮定に基づいているため、生成量で見られた本評価との大小関係が結果的に逆転

した。

なお、測定値を元にした東電評価値は  $2.7\text{E-}2 \text{ Bq/cm}^3$  であるが、本評価値はその約 1/17 倍と大きく過小評価となっている。これは、自発核分裂および  $(\alpha, n)$  反応による中性子は、燃料に吸収されて再度、核分裂連鎖反応を起こす（以下、「二次核分裂」と呼ぶ）が、ここまでの評価では考慮されていないからである。

### 3. 6 格納容器からの漏洩効果（参考解析）

2号機では、格納容器が一部破損し、雰囲気内に滞留した Xe の一部が漏洩している可能性がある。この漏洩率を  $14\text{m}^3/\text{hr}$  とした場合の格納容器雰囲気内濃度は以下の通りである。

Xe-133 濃度  $1.15\text{E-}3 \text{ Bq/cm}^3$  (0.86 倍)

Xe-135 濃度  $1.51\text{E-}3 \text{ Bq/cm}^3$  (0.94 倍)

漏洩による補正は 6-14%程度であり、上記 3.5 のガス放出率の不確かさ幅と比較すると十分に小さい。

### 3. 7 二次核分裂の影響（参考解析）

二次核分裂反応の総数は、体系の実効増倍率  $k$  によって決まり、すべての世代を足し合わせた総和は、

$$N_{\text{SUM}} = kN_0 + k^2 N_0 + \dots = N_0 k (1 + k + k^2 + \dots) = \frac{N_0 k}{1 - k}$$

で求められる。なお、上記において第ゼロ世代 ( $N_0$ ) の項は、当初からあった中性子であり、二次核分裂で発生したものではないので総和には含まれない。

図 3 に自発核分裂と  $(\alpha, n)$  反応による中性子発生数の時間推移を示す。中性子発生数を出力に換算し、その時間推移（主に Cm-242 の崩壊）を考慮して I および Xe の生成量を評価した（図 4）。

二次核分裂によって発生する Xe 量とガス放出率 0.6%を仮定した場合の格納容器雰囲気内濃度は以下の通りとなった。

[Xe インベントリ]

Xe-133 放射能量  $7.62\text{E+}8 \text{ Bq}$  (東電評価値：報告なし)

Xe-135 放射能量  $9.10\text{E+}8 \text{ Bq}$  (東電評価値：報告なし)

[格納容器雰囲気内濃度] (放出率 0.6%)

Xe-133 濃度  $1.52\text{E-}3 \text{ Bq/cm}^3$  (東電評価値：報告なし)

Xe-135 濃度  $1.82E-3 \text{ Bq/cm}^3$  (東電評価値: 報告なし)

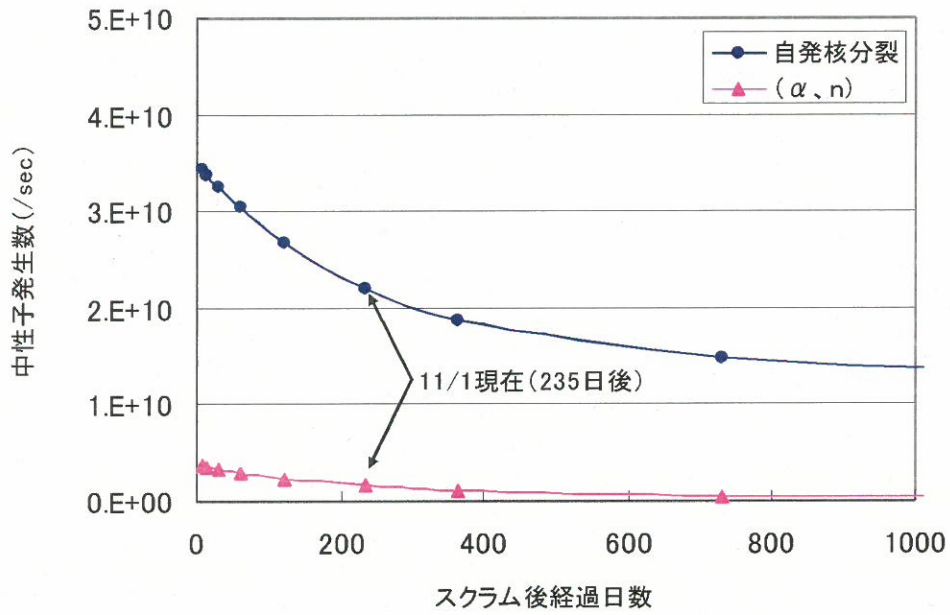


図3 中性子発生数の時間推移

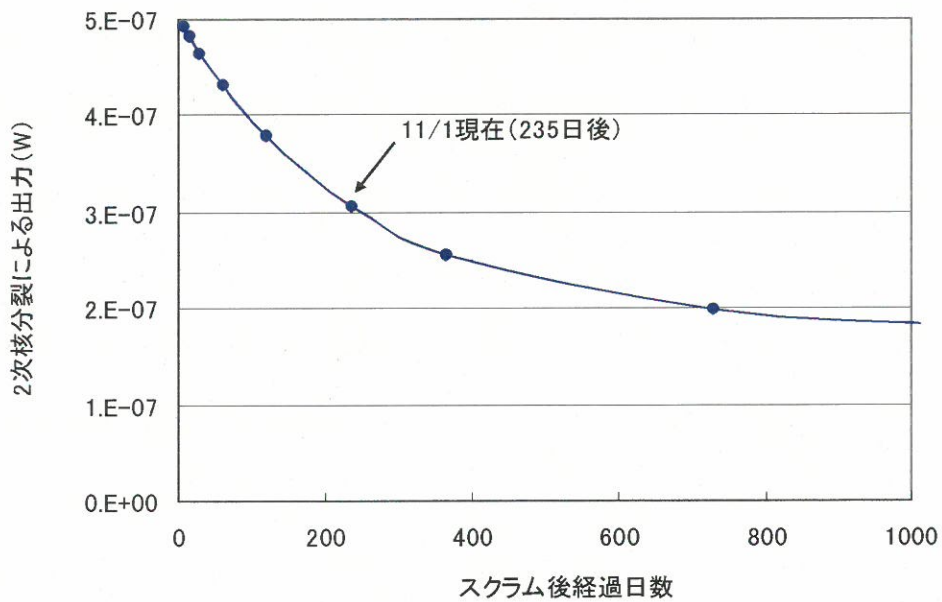


図4 二次核分裂による出力の時間推移 (k=1, 第1世代のみ)

二次核分裂の寄与率は、実効増倍率  $k$  に依存するため、最終的な Xe インベントリと格納容器雰囲気内濃度は実効増倍率の関数として以下のように表される。

[Xe インベントリ]

$$\underline{\text{Xe-133 放射能量}} \left( 6.70 + 7.62 \frac{k}{1-k} \right) \times 10^8 \text{ Bq}$$

$$\underline{\text{Xe-135 放射能量}} \left( 8.00 + 9.10 \frac{k}{1-k} \right) \times 10^8 \text{ Bq}$$

[格納容器雰囲気内濃度] (放出率 0.6%)

$$\underline{\text{Xe-133 濃度}} \left( 1.34 + 1.52 \frac{k}{1-k} \right) \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^3$$

$$\underline{\text{Xe-135 濃度}} \left( 1.60 + 1.82 \frac{k}{1-k} \right) \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^3$$

$k$  を関数とした Xe インベントリ、格納容器雰囲気内濃度を図 5、6 に示す。

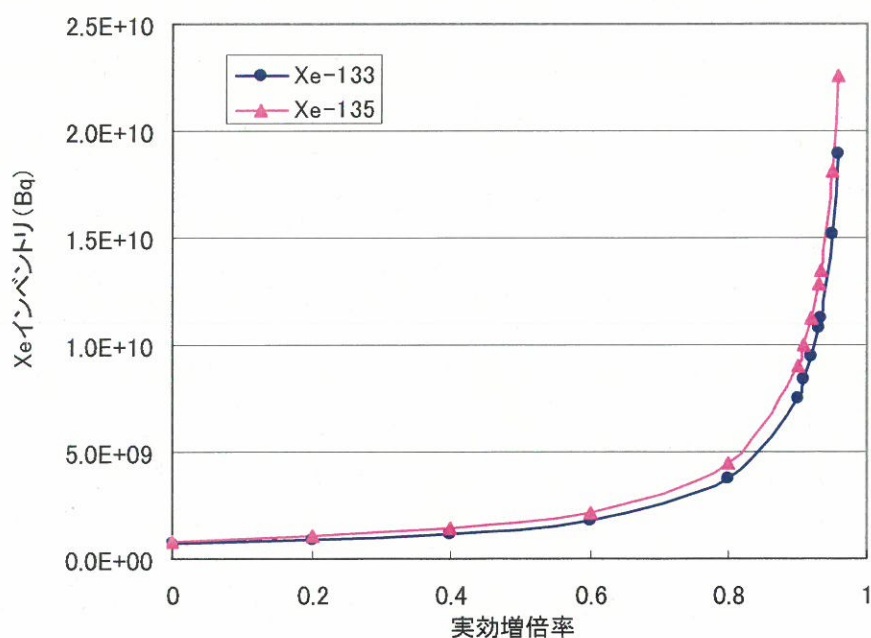


図 5 二次核分裂を考慮した Xe インベントリ

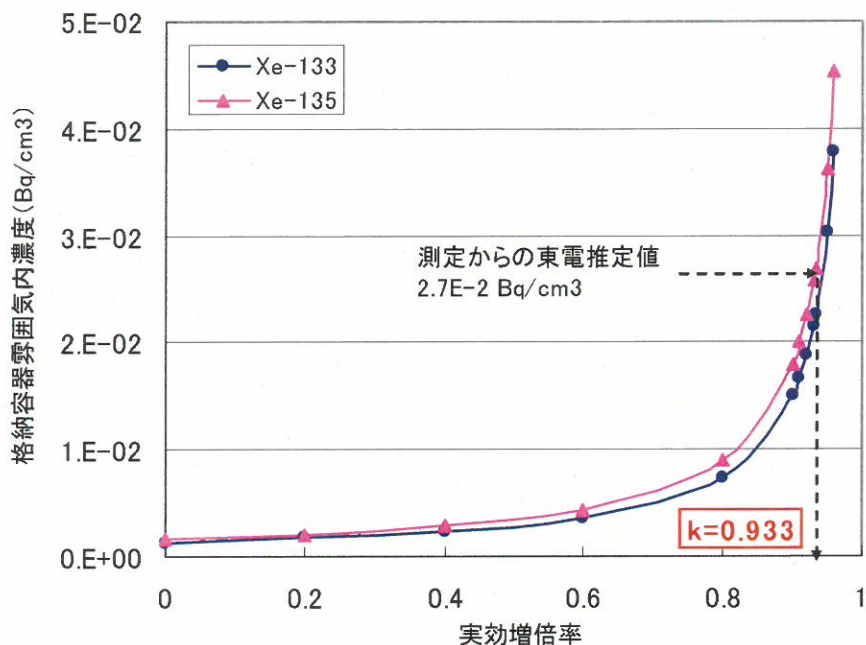


図6 二次核分裂を考慮した格納容器内雰囲気濃度

東電の評価によれば、測定から算定された Xe-135 の格納容器内雰囲気濃度は  $2.7\text{E}-2\text{Bq/cm}^3$  であるとしている。この結果を図6に当てはまると、実効増倍率は 0.933 となる。ただし、この結果はガス放出率によって大きく影響を受けるため、不確かさは極めて大きいと考えられる。付録3の結果を元に、粒径分布を考慮してガス放出率を補正した実効増倍率の計算結果を参考までに以下に示す。

【粒径の標準偏差が 2mm の場合】  $k=0.911$

【粒径の標準偏差が無限大の場合】  $k=0.846$

#### 4. まとめ

本検討で想定した条件は不確定要素が大きく、中でも再固化した燃料のガス放出率については十分な知見がないのが実情である。このため、現状では格納容器内の Xe 濃度から体系の実効増倍率を定量的に推定することは非常に困難である。それにも関わらず、Xe 濃度は再臨界検知の観点から重要な情報であり、定期的かつ継続的な監視体制を取ることが望ましい。

## 付録 1

### 福島第一原子力発電所 2 号機におけるキセノン濃度変化シミュレーション

#### 1. 概要

本報では、ホウ素注入による出力低下を考慮した場合の格納容器雰囲気中キセノン濃度の時間推移を検討した。

#### 2. 評価条件

##### (1) 压力容器雰囲気中の Xe 濃度

燃料デブリからの放出率を 0.6% とし、燃料デブリ中に蓄積された Xe 全量の 0.6% が压力容器雰囲気中に存在するものとした。実際には、燃料デブリから压力容器雰囲気へ移行する際に時間遅れが存在するはずであるが、本評価ではこれを無視し、燃料デブリ中の Xe 量の時間変化が雰囲気中濃度に即時に反映されるとした。

$$D_p(t) = 0.006 \times W_f(t) / V_p$$

ただし、 $D_p$  : 压力容器雰囲気内濃度、 $W_f$  : 燃料デブリ内全 Xe 量 (崩壊を含む、ORIGEN 計算値)、 $V_p$  : 压力容器内自由体積 (401.2m<sup>3</sup>)

##### (2) 格納容器雰囲気中の Xe 濃度

前報(1)と同様、格納容器への窒素注入量分 (14m<sup>3</sup>/hr) の雰囲気が 100% 压力容器を経由して移行するものとした。また、Xe-135 の崩壊を考慮した。ヨウ素 (I-135) については、压力容器に全量とどまるとした。初期濃度は、平衡条件から得られる以下の式により算定した。

$$\frac{dD_c(t)}{dt} = \frac{F}{V_c} (D_p(t) - D_c(t)) - \lambda D_c(t)$$

ただし、 $D_c$  : 格納容器雰囲気内濃度、 $F$  : 窒素流量 (14m<sup>3</sup>/hr)、 $V_c$  : 格納容器内自由体積 (3000m<sup>3</sup>)、 $\lambda$  : キセノンの崩壊定数

$$D_c(0) = \frac{F}{F + \lambda V_c} D_p(0) = 0.0577 \times D_p(0)$$

##### (3) ホウ素注入による反応度

10/17 東電プレス資料 p.4-35 に従い、ホウ素注入により固有値が 3% 減少するものとした。体系の初期臨界固有値は、以下の 3 ケースを想定した。

- ・ケース 1 : 初期  $k=0.96 \rightarrow$  ホウ素注入後  $k=0.93$
- ・ケース 2 :  $k=0.93 \rightarrow 0.90$
- ・ケース 3 :  $k=0.90 \rightarrow 0.87$

### 3. 評価結果

ホウ素注入後の Xe-135 濃度の評価結果を表 1 に、全ケースの濃度の時間推移を図 1~3 に示す。臨界に最も近いケース 1 でホウ素注入後の相対濃度変化は最大となった。

ホウ素注入前後の臨界固有値を  $k_B, k_A$  と置くと、前後の出力変化比は以下の式で与えられる (表 1 の「出力変化」)。

$$\frac{1}{1-k_A} \bigg/ \frac{1}{1-k_B} = \frac{1-k_B}{1-k_A}$$

Xe-135 濃度の平衡値は出力変化比 (Xe-135 発生量に比例) とほぼ一致した。

時間推移については、約 3 日後にほぼ一定濃度に低下した。ホウ素注入後 1 日では、最も臨界に近いケース 1 においても濃度変化は 14% にすぎず、Xe-135 の濃度変化のみで炉心の未臨界状態を判定することは測定精度から見て難しい。未臨界がより深いケース 2、3 ではさらに判定は難しくなる。

実際には、格納容器に注入された窒素の大部分が圧力容器を経由せず、直接サンプリン グラインへ移送すると考えられるので、検出される Xe-135 濃度はさらに低下し、判定も困難になると考えられる。

表 1 ホウ素注入後の格納容器雰囲気内 Xe-135 濃度 (10<sup>2</sup> Bq/cc)

		ケース 1	ケース 2	ケース 3
固有値変化		0.96 → 0.93	0.93 → 0.90	0.90 → 0.87
Xe-135 濃度	ホウ素注入前	1.54 (1.00)*	0.88 (1.00)*	0.62 (1.00)*
	注入 1 日後	1.33 (0.86)	0.80 (0.91)	0.57 (0.92)
	2 日後	1.05 (0.68)	0.68 (0.77)	0.51 (0.82)
	3 日後	0.93 (0.60)	0.64 (0.73)	0.49 (0.79)
	4 日後	0.90 (0.58)	0.62 (0.70)	0.48 (0.77)
	5 日後	0.89 (0.58)	0.62 (0.70)	0.48 (0.77)
	6 日後	0.88 (0.57)	0.62 (0.70)	0.47 (0.76)
	7 日後	0.88 (0.57)	0.62 (0.70)	0.47 (0.76)
出力変化** (参考値)		(0.57)	(0.70)	(0.77)

\*ホウ素注入前からの比

\*\*ホウ素注入前後の出力変化 (定義については本文参照)

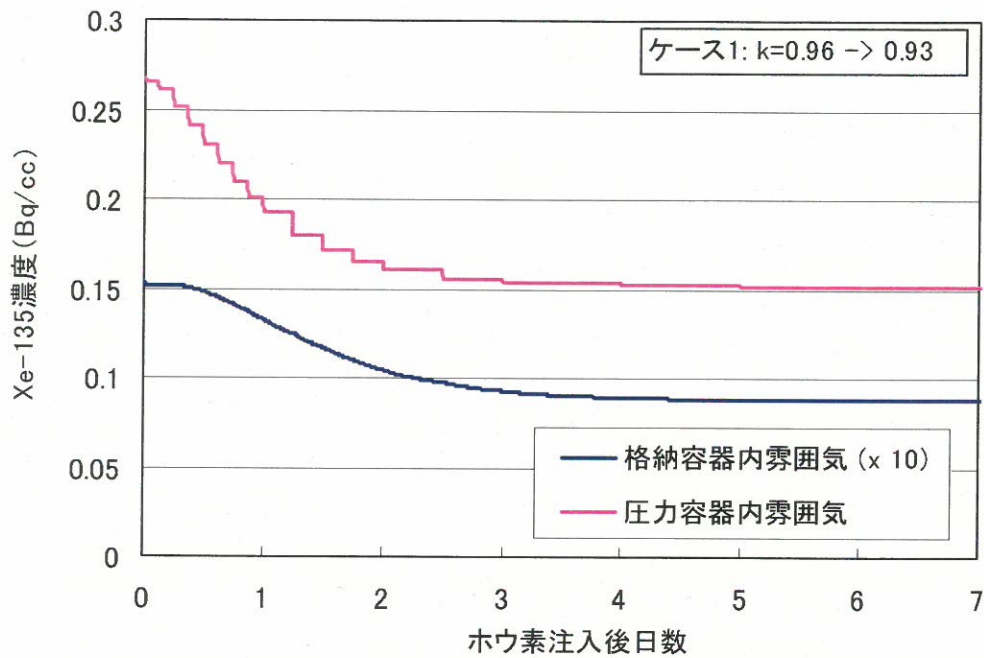


図1 ホウ素注入後のキセノン 135 濃度変化 (1) ケース 1

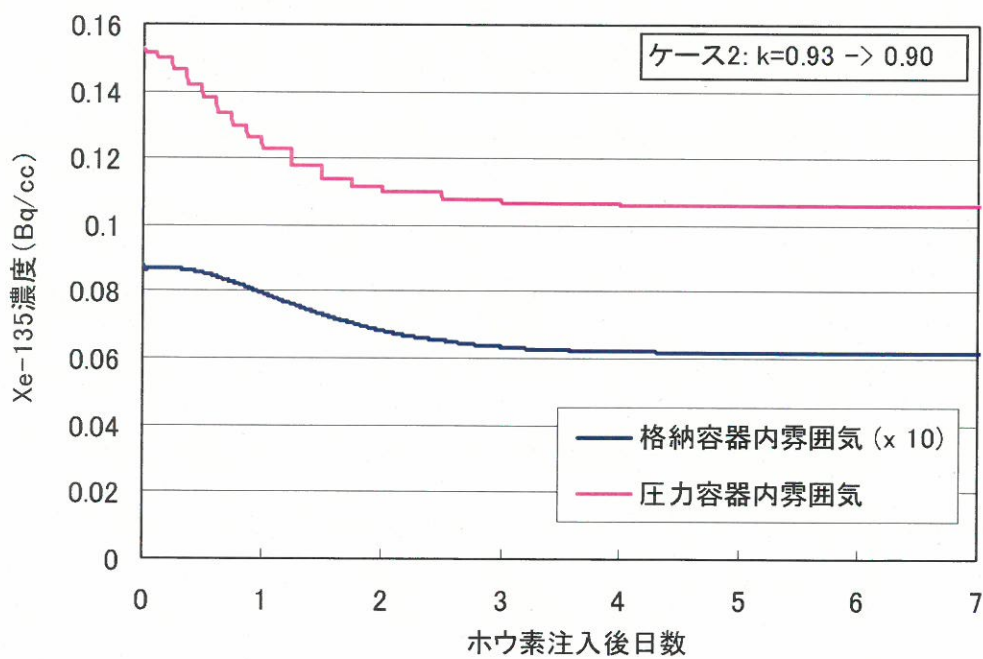


図2 ホウ素注入後のキセノン 135 濃度変化 (2) ケース 2

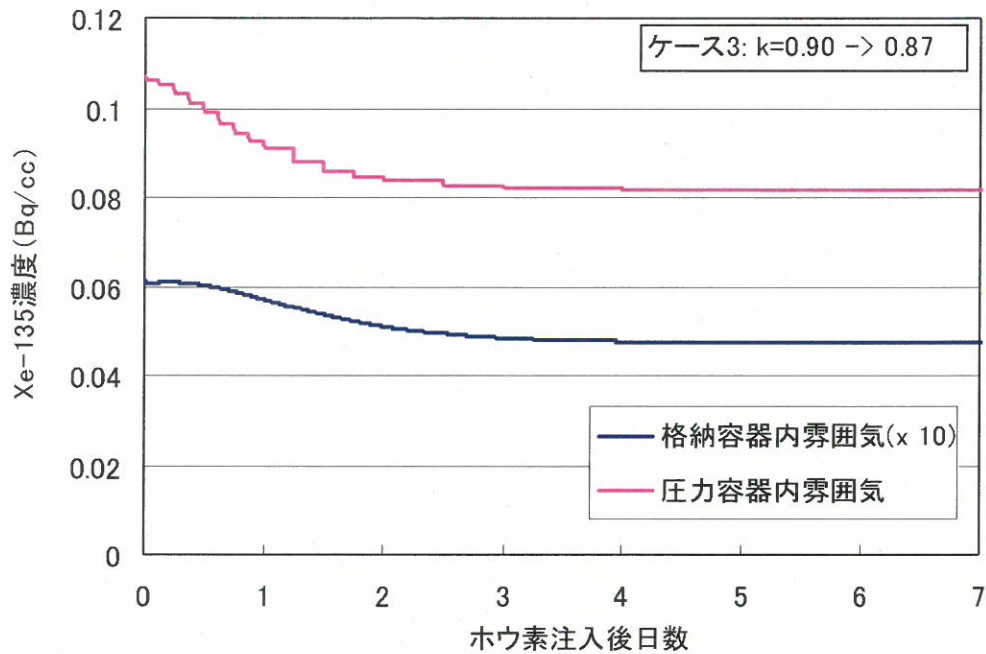


図3 ホウ素注入後のキセノン 135 濃度変化 (3) ケース 3

#### 4. 東電の測定データとの比較

東電の 11/4 付プレス資料によると、格納容器内の Xe-135 濃度は  $2.7 \times 10^{-2} \text{Bq/cc}$  であったとされる。表 1 の結果と比較すると、ケース 1 よりも測定値の方が 2 倍程度大きくなっている。また、格納容器に注入された窒素の大部分が圧力容器を経由せず、直接サンプリングラインへ移送されるであろうことを考慮すると、さらに両者の差は広がる可能性が高い。今後、以下のような要因について引き続き検討が必要である。

- ・燃料デブリからの放出率 (0.6%) の見直し
- ・燃料の一部が格納容器内に落下したため、格納容器に直接 Xe-135 の生成パスが発生した可能性

### 燃料ペレットからの FP ガスの放出について

燃料ペレットからの核分裂生成ガス (FP ガス) 放出のメカニズムとしては、以下の 3 つが考えられる。

- (1) 拡散による放出：ペレット内での FP 濃度勾配による拡散・移動放出
- (2) リコイル (反跳) による放出：ペレット表面近くでの反跳エネルギーによる直接放出
- (3) ノックアウト (はじき出し) による放出：ペレット表面近くでののはじき出しによる放出

上記メカニズムのうち、拡散による放出は温度に依存し、温度が高くなるほど拡散による FP ガスの放出率が大きくなる。図 1 は、照射済み燃料を加熱してペレット外に放出される FP を計測したアニーリング試験及び燃料を照射しながらペレット外に放出される FP を計測したガススイープ試験により得られた拡散定数の実測値を示す。ガススイープ試験の測定値には、リコイルやノックアウトの寄与が含まれている。

図 1 から、温度が高くなるにつれて拡散定数が大きくなり、拡散による FP の放出が大きくなっている。これに対して、低温領域では拡散定数の温度依存性が小さく、拡散による放出は小さくなるものの、リコイル及びノックアウトによる放出は核分裂密度に依存し、温度には依存しないため、低温領域においてもある程度 FP が放出される。

また、図 2 は、ガススイープ試験により取得した短半減期核種 Xe-138 のギャップ放出割合の実測値を示す。図 2 から、燃料中心温度が高くなるにつれて Xe-138 の放出率が大きくなっているが、低温領域では温度依存性が小さく、670°C 以下では FP ガスの放出は非常に小さい。

以上のとおり、燃料温度が 700°C 以下の低温領域では拡散による FP ガスの放出は極めて小さく、リコイル及びノックアウトによってある程度 FP ガスが放出されると言える。

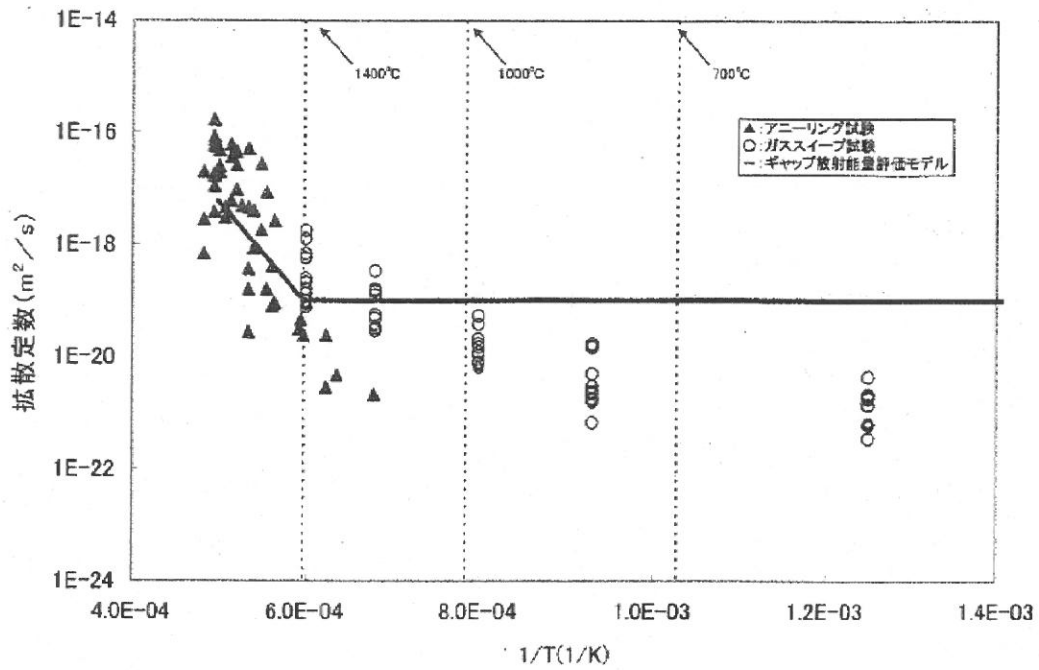


図1 燃料ペレットのアニーリング試験及びガススイープ試験に基づく拡散定数の実測値

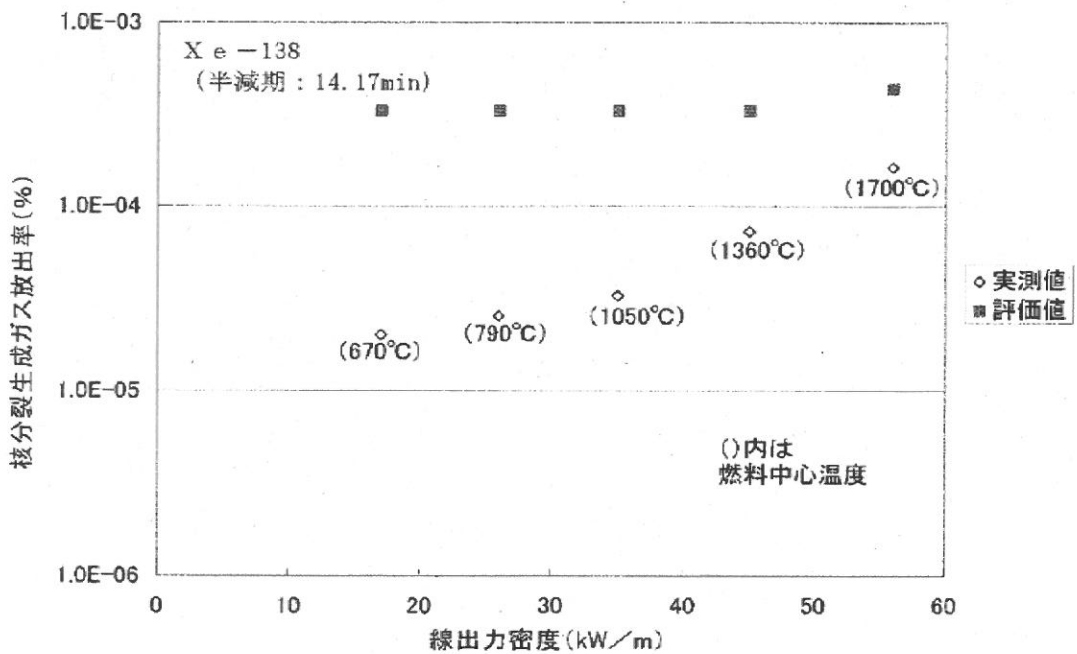


図2 ガススイープ試験における短半減期核種 Xe-138 の FP ガス放出率の実測値

## デブリ粒径分布のガス放出率への影響評価

## 1. 概要

本報では、球状デブリの半径の分布が正規分布であると仮定して、ガス放出率への影響を評価した結果を示す。

## 2. 評価条件

ガス放出率は表面積  $S$  に比例するが、本検討のようにデブリの総体積が一定の条件下での比較では、単位体積あたりの表面積 ( $S/V$  値) がガス放出率の指標として適切である。

燃料デブリは完全な球形であると仮定し、その半径の平均値を  $5\text{mm}$  とした。標準偏差がゼロの場合、 $S/V$  値は

$$\frac{S}{V} = \frac{4\pi r^2}{4/3\pi r^3} = \frac{3}{r} = 0.6[\text{mm}^{-1}]$$

で与えられ、最小値を取る。標準偏差が大きくなると、粒径が平均値よりも大きい粒子と小さい粒子が同じ割合で増えるが、表面積比への影響が  $1/r$  に比例することから、小さい粒子の影響が大きい粒子を上回り、平均的な  $S/V$  値は増加する。

本検討では、標準偏差を  $0$  から  $2.5\text{mm}$  まで増加させて  $S/V$  値を数値解析的に求めた。なお、粒径がゼロになると  $S/V$  比が無限大になるので、粒径の最小値を  $0.1\text{mm}$ 、最大値を  $10\text{mm}$  とした。

## 3. 評価結果

図 1 に粒径の標準偏差が  $0.5\text{mm}$ ,  $1\text{mm}$ ,  $2\text{mm}$  の場合の粒径分布を示す。また、図 2 に粒径の標準偏差と  $S/V$  値の関係を示す。標準偏差が  $2\text{mm}$  の時、 $S/V$  値は約  $0.8$  となり、ガス放出率は粒径のばらつきを考えない場合 ( $S/V=0.6$ ) よりも約  $30\%$  増大した。なお、標準偏差を無限大に外挿すると、粒径分布は一様分布となり、 $S/V$  は上限値  $1.3955$  ( $S/V$  増加率は約  $2.3$  倍) に近づく。

$$\frac{S}{V} = \frac{1}{10-0.1} \int_{0.1}^{10} \frac{3}{r} dr = \frac{3}{10-0.1} [\ln(10) - \ln(0.1)] = 1.3955$$

結論として、デブリ粒径のばらつきを考慮すると、 $30\%$ 程度ガス放出率が増大する可能性があるが、最大でも  $2.3$  倍を超えない。

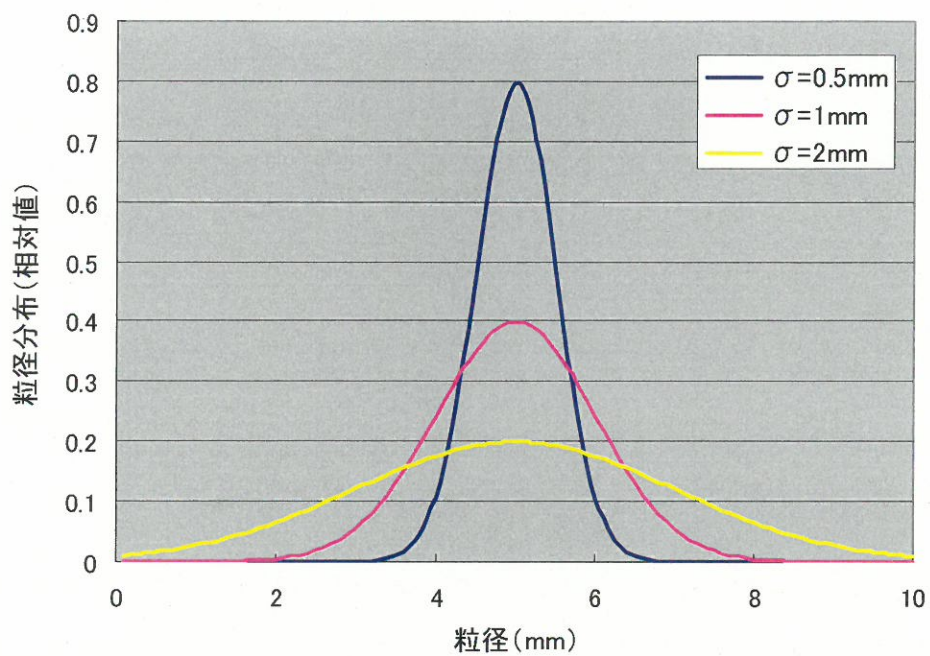


図1 デブリ粒径の分布比較 (正規分布モデル)

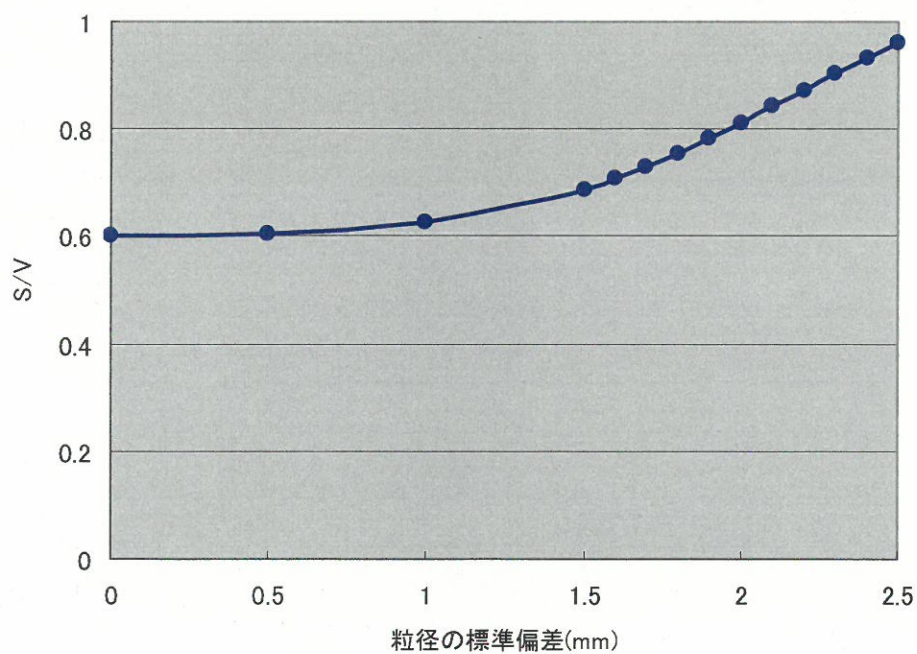


図2 粒径の標準偏差と S/V 値の関係

## 福島第一原子力発電所 2 号機における再臨界時のキセノン 135 濃度評価

原子力システム安全部

H24.3.15

## 1. 概要

本報では、未臨界状態から再臨界が発生した場合の評価を行い、再臨界が起きた際には格納容器濃度が大幅に上昇することを確認した。

## 2. 評価条件

## (1) ガス移送モデル

格納容器への窒素注入量分 (14m<sup>3</sup>/hr) の雰囲気が 100% 圧力容器を經由して移行するものとした。また、Xe-135 の崩壊を考慮した。ヨウ素 (I-135) については、圧力容器に全量とどまるとした。

## (2) 再臨界の発生パターン

初期状態を  $k=0.96$  とし、付録に示すケース A1~A3 の条件で再臨界が発生するものとし、おのこのケース 1~3 とした。再臨界発生周期については、冷却によりボイド率が 100% から 0% に変化する際の所要時間、すなわち反応度添加時間の 6 倍 (付録参照) とした。

- ・ケース 1 (再臨界発生パターン・ケース A1) 周期 6 分
- ・ケース 2 (ケース A2) 周期 1 時間
- ・ケース 3 (ケース A3) 周期 10 時間

ケース A1、A2 については、I-135 と Xe-135 の崩壊定数から見て十分に短期間であるため、平均出力が継続して出ると仮定した計算を行った。ケース A3 については、ピーク出力とその後の 10 時間の減衰を 2.5 時間×4 ステップで近似した。

## 3. 評価結果

ホウ素注入後の Xe-135 濃度の評価結果を表 1 に、全ケースの濃度の時間推移を図 1~3 に示す。最も反応度投入が緩やかなケース A3 で、Xe-135 濃度の静定値がほぼ臨界判定基準である 1Bq/cc (3/14 時点の暫定値) に到達し、臨界検出が可能であることがわかった。ただし、原子炉圧力容器と原子炉格納容器の体積差から生じる時間遅れのため、再臨界発生から検出まで最大で 4 日程度必要と考えられる。

表1 ホウ素注入後の格納容器雰囲気内 Xe-135 濃度 (Bq/cc)

ケース名	ケース 1	ケース 2	ケース 3	
初期状態	k = 0.96 (未臨界)			
再臨界発生パターン	ケース A1	ケース A2	ケース A3	
Xe-135 濃度	再臨界発生前	1.5 × 10 <sup>-2</sup>		
	発生 1 日後	9.6 × 10 <sup>1</sup>	4.8 × 10 <sup>0</sup>	4.3 × 10 <sup>-1</sup>
	2 日後	2.6 × 10 <sup>2</sup>	1.3 × 10 <sup>1</sup>	8.2 × 10 <sup>-1</sup>
	3 日後	3.2 × 10 <sup>2</sup>	1.6 × 10 <sup>1</sup>	9.3 × 10 <sup>-1</sup>
	4 日後	3.4 × 10 <sup>2</sup>	1.7 × 10 <sup>1</sup>	9.7 × 10 <sup>-1</sup>
	5 日後	3.4 × 10 <sup>2</sup>	1.7 × 10 <sup>1</sup>	9.9 × 10 <sup>-1</sup>
	6 日後	3.4 × 10 <sup>2</sup>	1.7 × 10 <sup>1</sup>	9.8 × 10 <sup>-1</sup>
	7 日後	3.4 × 10 <sup>2</sup>	1.7 × 10 <sup>1</sup>	9.9 × 10 <sup>-1</sup>

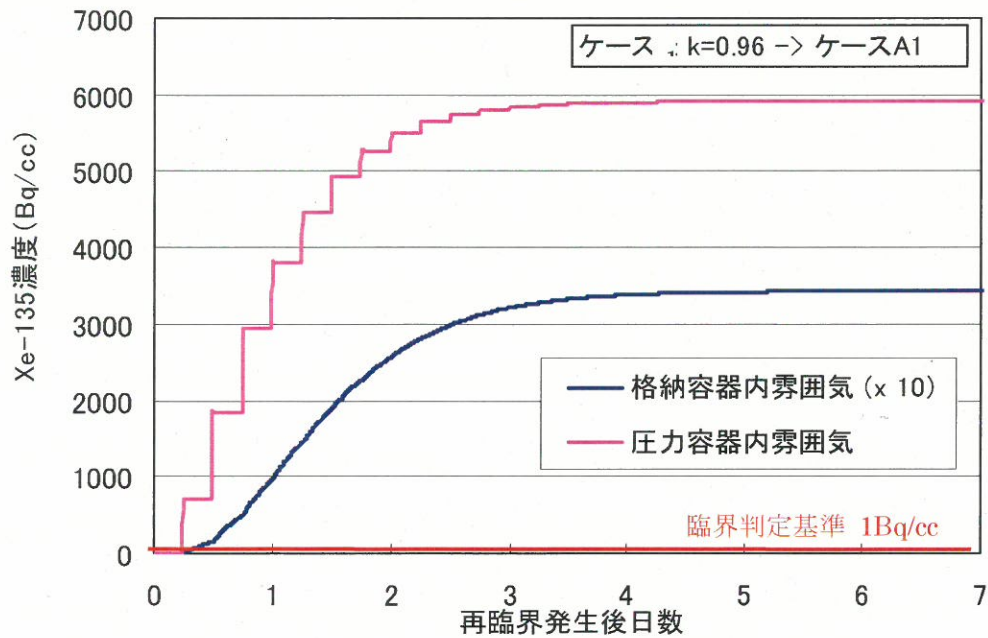


図1 再臨界発生後のキセノン 135 濃度変化 (1) ケース 1

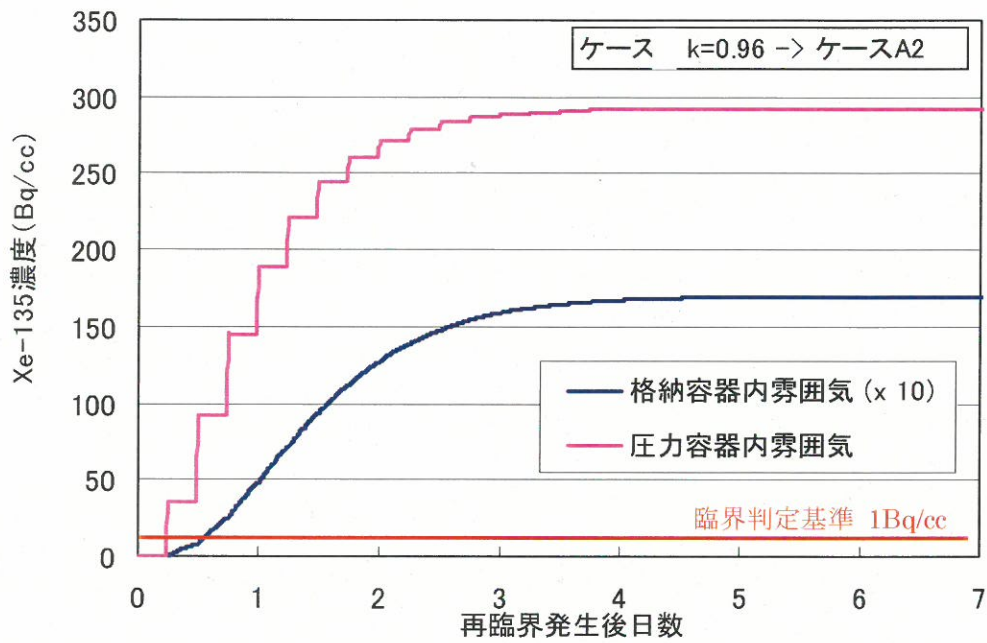


図2 再臨界発生後のキセノン 135 濃度変化 (2) ケース 2

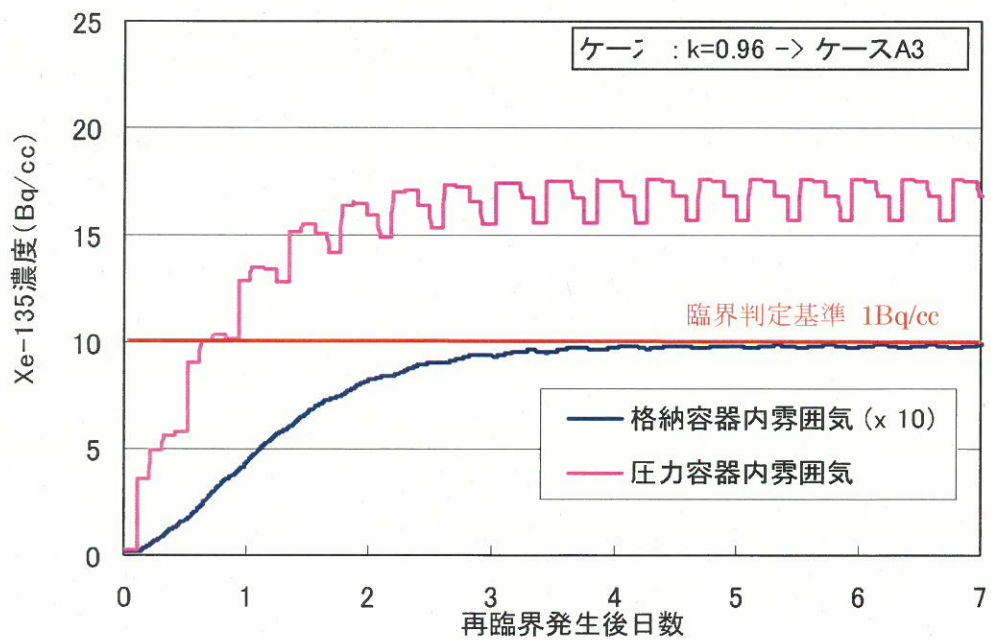


図3 再臨界発生後のキセノン 135 濃度変化 (3) ケース 3

[付録]

再臨界発生パターンで想定したケース

		ケースA1	ケースA2	ケースA3	ケースB
入力条件	反応度(ドル)	9.0			2.8
	反応度添加時間	60秒	600秒	6000秒	1日
	反応度添加率(セント/秒)	15	1.5	0.15	0.003
解析結果	ピーク出力	3940MW	50.7MW	3.4MW	64.2kW
	ピーク発生時刻	7.8秒	59.0秒	334秒	60分
	総出力(MJ)	66.6	33.7	19.8	5.8
	平均出力(kW)*	190	9.4	0.6	0.07

- (1) 反応度は、ボイド率が 16.7%から 0%に変化する際のボイド反応度(約 9 ドル)とした。
- (2) 上記の変化は、除熱量を増大したため、ボイドが一定の割合で潰れることにより生じるとした。
- (3) 反応度添加時間は、ボイド全量が消失するのに要する時間とし、60~6000 秒まで変化させた。
- (4) 平均出力は、本文にある周期の定義に従い、総出力を周期で割って求めた。再臨界が発生すると、ボイド率は一旦 100%に到達し、その後、冷却により再びボイド率が低下する。すべてのボイドが消失するまでの所要時間は、

$$\text{反応度添加時間} / 0.167 = 6.0 \times \text{反応度添加時間}$$

である。