

「令和元年度破損燃料輸送・貯蔵に係る技術調査」
安全評価項目の感度整理（水素発生量）の評価結果について
三菱重工業株式会社／ニュークリア・デベロップメント(株)

2020年2月4日

1. まえがき

本資料は、規制庁殿委託調査「破損燃料輸送・貯蔵に係る技術調査」の実施項目である「安全評価項目の感度の整理」のうち、輸送容器内の水素発生量評価の評価結果を纏めたものである。

2. 輸送容器内の水素発生量評価

2.1 評価方針

輸送容器内の水素発生量について、内部の水分が全て分解する場合と、放射線分解によって経時的に増加する場合の2種類について評価を実施した。

2.2 評価

2.2.1 評価方法

(1) ケース1：輸送容器内の残留水が全て分解とした場合

輸送容器¹内に水分が残留すると、デブリから放出される放射線のエネルギーが水に吸収されることによって、水の放射線分解反応が起きる。気相部が存在する場合には、生成した水素と酸素が、ほぼ2：1の割合で気相中に移行する。水の分解速度は、水のエネルギー吸収率によるが、ここでは、残留水が全て分解($H_2O \rightarrow H_2 + (1/2)O_2$)したとして、水素発生量 H_0 を評価する。25℃、1atm において、

$$H_0 = \frac{w}{M} \cdot 24.4 \left(\frac{l}{mol} \right)$$

ここで、 H_0 ：水素発生量(L)

w ：水分量 (g)

M ：水の分子量 (=18)

この場合、水素濃度は次式で与えられる。

$$C_0 = \frac{H_0}{V + \left(\frac{3}{2}\right)H_0} \times 100$$

¹ 輸送容器内に別途サンプル用の密閉容器を使用する場合は、密閉容器が評価対象となる。

ここで、Co：水素濃度(%)

V：容器内容積(L)

本評価結果は、最も安全側（上限値）の評価結果を与える。本評価では、水分量のみで水素発生量が定まるため、水分量をパラメータとして水素濃度を評価する。

(2) ケース 2：水の放射線分解を考慮した場合

ケース 2 では、燃料デブリに残存する水分に、放射線エネルギーが吸収されて放射線分解反応が起きることによって発生する水素量を評価する。TMI-2 において、炉心から取り出した燃料デブリの収納缶の水素発生量を評価している*1。生成した水素は、水に戻る逆反応によって生成が抑えられることが推定されるが、ここでは、この反応は考慮せず、高めの水素発生量を評価する。

本ケースにおける水素発生量の評価式*1 を以下に示す。25℃、1atm において、

$$H = D \times F \times W \times G(\text{H}_2) \times \frac{24.4 \left(\frac{\text{L}}{\text{mol}} \right)}{1.602 \times 10^{-19} \left(\frac{\text{J}}{\text{eV}} \right) \times 100(\text{eV}) \times 6.02 \times 10^{23}(\text{n})} \times t \times 3600(\text{s})$$

ここで

H：水素発生量(L)

D：燃料デブリの単位重量当たりの発熱量 (W/kg)

F：水に対する吸収割合(-)

W：燃料デブリの重量(kg)

G(H₂)：水素の G 値(n/100eV)

t：時間(hr)

上式において、F は放射線エネルギーのうち、水に吸収される割合を表している。放出される放射線のうち、γ線は水を透過するため、一部のエネルギーしか水に吸収されないと推定されるが、ここではすべてのエネルギーが水に吸収される(F=1)として、保守的に評価する。一方、α線とβ線については、燃料デブリ自体の自己吸収によって、水に吸収される割合は小さくなると推定されるが、α線とβ線についても、すべてのエネルギーが水に吸収される(F=1)として、保守的に評価する。

この場合、水素濃度は次式で与えられる。

$$C_0 = \frac{H_0}{V + \left(\frac{3}{2}\right)H_0} \times 100$$

ここで、 C_0 : 水素濃度(%)

V : 容器内容積(L)

2.2.2 評価条件

(1) ケース 1

本ケースでは、水素発生量は水分量のみで定まる。燃料デブリは、乾燥状態での輸送が想定されるが、ここでは水分量をパラメータとして、水素の爆発限界濃度(4%)に到達する水分量を評価する。

なお、容器内容積は、別途選定された輸送容器 (NFI-XB 型) または、同輸送容器に収納する内容器に基づき、設定する。

(2) ケース 2

ケース 2 における評価条件を表 2.2.2-1 に示す。燃料デブリの発熱量については、2 号炉心平均の燃焼度と最も保守的となるピークペレット燃焼度の 2 ケースについて評価した。

表 2.2.2-1 評価条件

	設定値	備考
燃料デブリの発熱量 (W/kg-UO ₂)	2号炉心平均燃焼度 [REDACTED]	文献*2を参考に、2号機の冷却期間 10年時点の炉心平均燃焼度とピーク ペレット燃焼度での値を設定する。
	ピークペレット燃焼度 [REDACTED]	
燃料デブリ(UO ₂ 燃料 として)の重量 (kg-UO ₂)	0.1(kg-UO ₂)	輸送するデブリ重量の現実的な値を 設定。
デブリに含まれる燃 料の割合(-)	1.0	安全側の仮定 (2号機では、1.0よりも小さいと推 定される。)
輸送容器内容積(L)	[REDACTED]	NFI-XB型輸送容器の内容積相当 [REDACTED]
水素のG値(n/100eV)	0.45 (β/γ線) 1.4 (α線)	文献値*3より設定
水に対するエネルギ ー吸収割合(-)	1.0 (保守的な条件)	デブリの形状、水の状態、放射線の種 類に依存するが、保守的に1.0を仮定 (TMI-2では、0.2を設定)
(気相部容積) / (収 納缶内容積)の比(-)	ほぼ1.0	デブリの収納量によって変化するが、 デブリは少量と推定されることから、 (デブリの体積) << (容器内容積) と仮定
温度(℃)	25	室温近傍を仮定

引用文献

*1: J.O.Henrie and J.N.Appel, Evaluation of Special Safety Issues Associated with Handling the Three Mile Island Unit 2 Core Debris, GEND-051 (1985)

*2: 西原他、「福島第一原子力発電所の燃料組成評価」, JAEA-Data/Code2012-018 (2012)

*3: H.Christensen, Fundamental Aspects of Water Coolant Radiolysis, 6th International Workshop on LWR Coolant Radiolysis and Electrochemistry, Jeju Island, Korea, Oct. 27 (2006)

[REDACTED] 内は商業機密のため、非公開とします。

2.2.3 評価結果

(1) ケース 1

水分量をパラメータとして、すべての水が分解するとした過度に保守的に評価した水素濃度を図 2.2.3-1 に示す。図 2.2.3-1 から、水素濃度が 4%に達する水分量は、約 2.4g となる。燃料デブリ重量を 100g とした場合、含水率が 2.4%に相当する。燃料デブリを乾燥状態で収納することを想定すれば、含水率はさらに低くなると推定され、水素濃度も低く抑えられると考えられる。

次に、輸送容器内の内容器の容積をパラメータにして、容器内水素濃度が 4%に到達する水分量を評価した結果を図 2.2.3-2 に示す。図 2.2.3-2 から、内容器の内容積が小さくなると、容積に比例して水素濃度が 4%に到達する水分量も少なくなる。

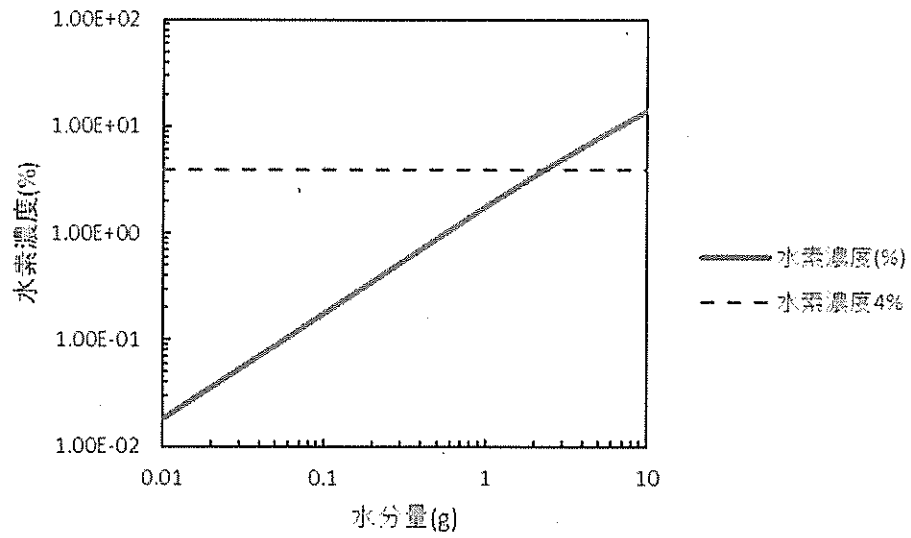


図 2.2.3-1 水分量と水素濃度の関係 (すべての水が分解した場合)

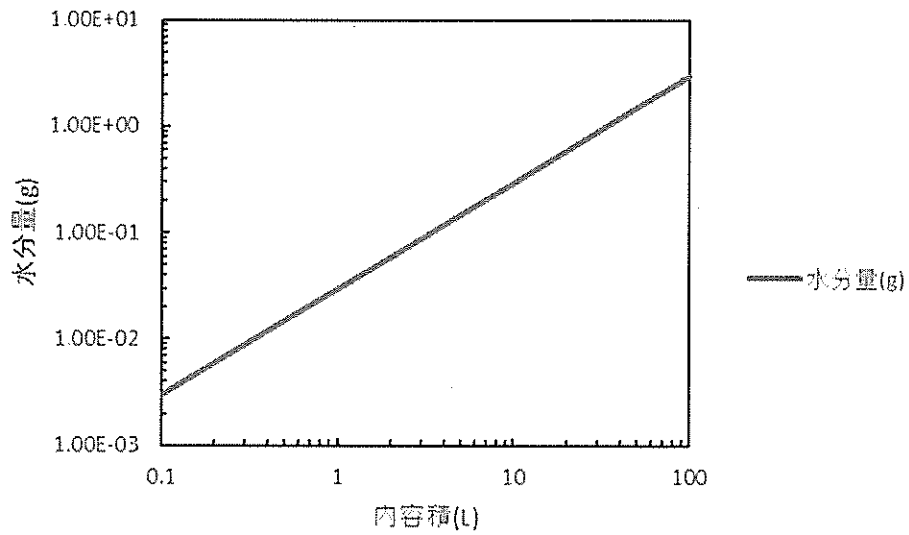


図 2.2.3-2 内容器の水素濃度が 4%に到達する水分量(すべての水が分解した場合)

(2) ケース 2

表 2.2.2-1 の評価条件に従って、水素濃度の時間変化を評価した結果を図 2.2.3-3 に示す。図 2.2.3-3 から、炉心平均燃焼度相当の燃料デブリの場合、水素濃度が 4% を超えるのは、燃料デブリを収納してから、約 410 日後となった。ピークペレットの燃焼度相当では、水素濃度が 4% を超えるのは、燃料デブリを収納してから、約 60 日後となった。なお、燃料デブリを収納する容器の内容積は、輸送容器の内容積相当としており、燃料デブリを収納する容器の内容積がさらに小さくなった場合には、水素濃度は高くなり（およそ内容積に反比例して水素濃度は高くなる）、水素濃度が 4% を超える時間が短くなる傾向となる。

図 2.2.3-3 の水素濃度は、輸送容器の内容積(75.3L)を用いて評価したものであるが、実際には、燃料デブリは内容器に入れられた状態で輸送容器に入れることが考えられる。そこで、現実的な輸送期間として 1 週間を想定して、内容器の容積をパラメータにして水素濃度を評価した。評価結果を図 2.2.3-4 に示す。図 2.2.3-4 から、炉心平均燃焼度相当の燃料デブリの場合、輸送後に水素濃度が 4% を超える内容器の内容積は、約 1L となった。一方、ピークペレットの燃焼度相当では、水素濃度が 4% を超える内容器の内容積は、約 8L となった。本容積程度の内容器であれば、100g 程度の燃料デブリは、内容器全体に置かれた状態にはならず、容器の底のほうに置かれた状態になることから、燃料デブリに同伴する水分も不均一となり、水に吸収される放射線エネルギーも小さくなることから、上記の評価は、実際よりも保守的な評価になっていると推定される。

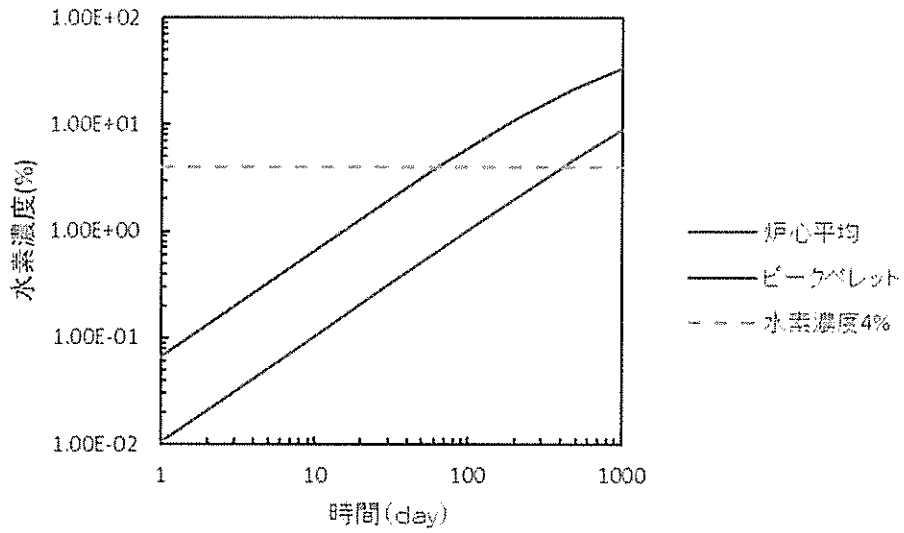


図 2.2.3-3 水素濃度の時間変化（水の放射線分解を考慮した場合）

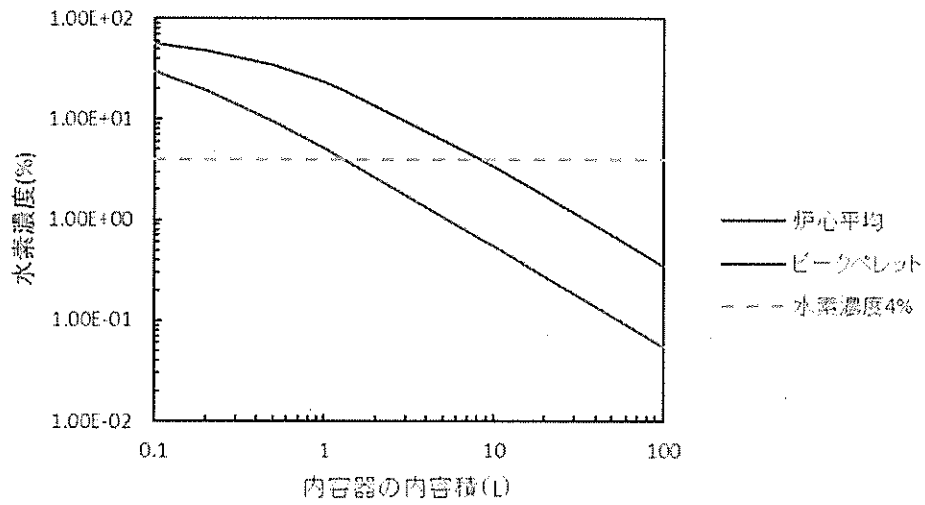


図 2.2.3-4 水素濃度と内容器内容積の関係（水の放射線分解を考慮した場合）

3. 水素発生量評価に関するまとめ

輸送する燃料デブリ重量を 100g として、輸送容器内の水素濃度を評価した結果、以下となった。

① 燃料デブリに残存する水がすべて分解するとした過度に保守的な条件では、輸送容器内の水素濃度が 4%に達する水分量は、約 2.4g となった。輸送容器内に内容物を置いた場合には、内容物の容積に比例して、水素濃度が 4%に達する水分量は少なくなる。

② 燃料デブリから放出される放射線のエネルギーがすべて水に吸収されて放射線分解するとした場合、水素濃度が 4%を超えるまでの期間は、以下の結果となった。

- ・ 炉心平均燃焼度相当の燃料デブリの場合：約 410 日後
- ・ ピークペレットの燃焼度相当の燃料デブリの場合：約 60 日後

一方、輸送期間として 1 週間を想定して、内容物の容積をパラメータにして水素濃度を評価した結果、水素濃度が 4%を超える内容物の内容積は、以下となった。

- ・ 炉心平均燃焼度相当の燃料デブリの場合：約 1L
- ・ ピークペレットの燃焼度相当の燃料デブリの場合：約 8L

なお、水の放射線分解を考慮した評価では、時間に比例して水素が発生するとしたが、発生した水素が水に戻る反応が起きることで、水素発生が抑えられるため、実際には、今回の評価よりも水素濃度は低くなると推定される。また、燃料デブリから放出される α 線、 β 線の一部は、燃料デブリの自己吸収によってエネルギーが消費され、水に吸収されるエネルギーが小さくなること、 γ 線は水を透過するため、一部のエネルギーしか水に吸収されないことを考慮すれば、今回の評価結果よりもさらに水素濃度は低くなると推定される。