

高温ナトリウムによるエロージョン開始時間の検討

1996年12月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1996

高温ナトリウムによるエロージョン開始時間の検討

若井隆純*, 青砥紀身*

要 旨

エロージョン現象においては、その開始までに要する時間（インキュベーションタイム）があると一般に言われている。本検討では、インキュベーションタイムに相当するエロージョン初期の過程において重要な役割を演じるのは、疲労であると仮定し、高温の液体ナトリウムが、炭素鋼に一定の速度で滴り落ちる場合のエロージョンに対するインキュベーションタイムを計算した。その結果、高温の液体ナトリウムの衝突によるエロージョン単独で炭素鋼が損傷を受けることはないが、炭素鋼およびナトリウムに化学反応による材質変化が起こった場合には、インキュベーションタイムが1時間未満となり、エロージョンによる損傷過程を考慮する必要があることが示された。

* 大洗工学センター 安全工学部 機器・構造安全工学室

A study on Incubation Time for Erosion by High Temperature Sodium

Takashi WAKAI*, Kazumi AOTO*

Abstract

Generally, it is required several periods for the damage initiation due to erosion. Such periods are called incubation time. This report describes the calculation of incubation time for erosion of a carbon steel subjected to dripping liquid sodium at elevated temperature, assuming fatigue plays the significant role in the early stage of erosion. It is clarified that the incubation time is remarkably long and it is needless to consider the damage due to erosion if there is no material property degradation. However, taking the material property degradation of carbon steel and liquid sodium into account, the incubation time may be short less than 1 hour in the most pessimistic case. So in this case, erosion must be considered as one of the damage mechanisms of carbon steel.

* Structural Safety Engineering Section, Safety Engineering Division, OEC.

目 次

1. 緒 言	1
2. インキュベーションタイムの計算方法	2
2.1 計算式	2
2.2 物性値	3
2.3 材質変化が物性値に及ぼす影響	3
3. 計算結果	6
3.1 材質変化を考慮しない場合	6
3.2 材質変化を考慮する場合	7
4. 結 言	9
5. 参考文献	10
謝 辞	11

表リスト

表3.1 エロージョンに対するインキュベーションタイム	7
表3.2 材質変化がある場合のエロージョンに対するインキュベーションタイム	8

図リスト

図3.1 液滴の落下頻度を表すパラメータ	6
----------------------------	---

1. 緒言

高速炉2次系配管においてナトリウム漏洩が発生した場合に、漏洩した高温の液体ナトリウムと構造材の間的高温化学反応による損傷については、詳細な実験的・解析的検討が行われているが、高速度の流体の衝突によって、固体表面が機械的に損傷を受ける現象、すなわちエロージョン（Erosion）現象による損傷に対しては、検討が行われていない。そこで、本報告書では、エロージョンを考慮する必要があるのかどうかについて検討を行った。

一般に、エロージョンの開始までには、ある一定の時間（インキュベーションタイム）を要することが知られている（1）。エロージョンの、とくにインキュベーションタイムに相当する初期の過程において重要な役割を演じるのは、疲労であるとの認識に立って、高温の液体ナトリウムが、炭素鋼に一定の速度で滴り落ちる場合のエロージョンの開始までに要する時間を計算した。さらに、落下する液体ナトリウムおよびその落下先の炭素鋼に、化学反応による材質変化が生じた場合のエロージョンに対するインキュベーションタイムを推定することを試みた。ただし、材質変化後の物性値（機械的性質、密度、音速など）のなかには、現状入手困難なものや、類似の物質の物性値等から類推して決めなければならないものもあったので、このようなものについては、インキュベーションタイムが小さくなる方向に保守的に想定して計算を行うこととした。

2. インキュベーションタイムの計算方法

2.1 計算式

エロージョンは高速で衝突する流体が固体を機械的に損傷させる現象である。したがって、これが問題となるのは航空機の機体やプロペラ、蒸気タービンのブレードなどである。これらの機器においては、金属表面への液滴の衝突によるエロージョンに関する研究が行なわれてきている(1~6)。直径dの球形の液滴が、均質と見なせる材料に、一定の速度Vで繰返し衝突する場合、エロージョン開始まで要する液滴の数が文献(1)に与えられている。この場合のインキュベーションタイム t_i は次式で計算することができる。

$$t_i = \frac{n_i}{Vq} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

- V : 液滴の衝突速度
- q : 単位体積中の液滴の数 (/m³)

$$n_i = \frac{4 a_1}{\pi d^2} \left(\frac{S}{P} \right)^{a_2} \quad : \quad \text{エロージョン開始までに必要な単位面積あたりの液滴の数}$$

- a_1, a_2 : 実験結果からフィッティングして決める (1) .
 $a_1 = 3.7 \times 10^{-4}, \quad a_2 = 5.7$

$$S = \frac{2 \sigma_u (b-1)}{1-2\nu_s} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

強度を表すパラメータ

$$P = \frac{\rho_L C_L V \cos \theta}{1 + \frac{\rho_L C_L}{\rho_s C_s}} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

応力を表すパラメータ

- d : 液滴の直径
- σ_u : 材料の引張強さ
- b : 疲労寿命線の傾き. $N_f = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma} \right)^b$
- ν_s : 材料のポアソン比
- ρ_s : 材料の密度
- C_s : 材料中の音速
- ρ_L : 液滴の密度
- C_L : 液滴中の音速

2.2 物性値

炭素鋼の材料特性は、SM400Bのものを用いることとしたが、一部入手できない情報については、純鉄等の値を用いた。なお、本節および次節で用いる物性値について、付録にまとめた。

d	: 液滴の直径	4.0 mm
a _f	: 破損に対応する疲労損傷値	1.0
σ _u	: 材料の引張強さ (SM400Bの500℃における実測値)	29.9kgf/mm ²
b	: 疲労寿命線の傾き. $N_f = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma}\right)^b$	23.3
	(※注意 = σ _u でN _f =1, 0.5σ _u でN _f ≥10 ⁷ であるという仮定に基づく)	
ν _s	: 材料のポアソン比	0.30
ρ _s	: 材料の密度 (※注意 = 純鉄の値)	7.86×10 ³ kg/m ³ (7)
C _s	: 材料中の音速 (※注意 = 純鉄の値)	5.12×10 ³ m/sec. (7)
ρ _L	: 液滴の密度	8.32×10 ² kg/m ³ (8)
C _L	: 液滴中の音速	2.32×10 ³ m/sec. (9)

2.3 材質変化が物性値に及ぼす影響

材質変化の影響をうける物性値は、次に示す(1)~(5)の5つであると考えられる。材質変化後のこれらの物性値について、炭素鋼、ナトリウムともに酸化することのみを想定して、現状入手可能なものを収集した。計算は、インキュベーションタイムが小さくなる方向にパラメータをとって、保守的な仮定のもとに行うこととした。

(1) 材料の引張強さ σ_u

酸化鉄の機械的性質については、文献(10)にFe₃O₄についての記載がある。これによると、それらは以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \text{ヤング率} & E = 2.4 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2 \\ \text{引張強さ} & \sigma_u = 8.6 \text{ kg/mm}^2 \text{ (RT)}, \quad 7.7 \text{ kg/mm}^2 \text{ (1000}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

酸化鉄の引張強さは、前節に示した炭素鋼の室温における引張強さ (=29.9kg/mm²) に比較すると3分の1以下に小さくなっていることが分かる。1000℃の高温においてはその値はさらに低く、室温における炭素鋼のそれのおよそ4分の1程度となっている。そこで、材質変化後の炭素鋼の引張強さは、材質変化前のその4分の1になると仮定して計算を行うこととする。

(2) 材料の密度 ρ_s

酸化鉄の密度については、文献(11)にその比重に関する記載がある。これによると、それは以下のとおりである。

FeO	5.7
Fe ₃ O ₄	5.16
FeO ₂	5.1~5.2 (製法により異なる)

したがって、酸化鉄の密度は、上記いずれの値をとっても、炭素鋼の密度(=7.86×10³ kg/m³)の約3分の2程度であるといつてよい。そこで、材質変化後の炭素鋼の密度は、材質変化前のその3分の2になると仮定して計算を行うこととする。

(3) 材料中の音速C_s

酸化鉄中の音速に関する明確な情報は現状入手できないが、文献(7)によると、固体中を伝わる縦振動の速度は、次式で与えられる。

$$C = \sqrt{E/\rho} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

E: ヤング率

ρ: 密度

すなわち、ヤング率が大きいほど、また、密度が小さいほど、固体中の音速は大きくなるといえる。炭素鋼のヤング率を2.1×10⁴ kg/mm²とすれば、(1)項に示した酸化鉄のヤング率(=2.4×10⁴ kg/mm²)はこれより約20%程度大きいといえる。また、酸化鉄の密度については、前項より炭素鋼の約3分の2であるので、酸化鉄中の音速は、炭素鋼中の音速に比べて約1.34倍大きくなるといえる。しかし、式(2.3)を見ると、材料中の音速が小さくなるほど応力を表すパラメータが大きくなる。すなわち、材料中の音速が小さくなるほどエロージョンに対するインキュベーションタイムは小さくなる。そこで、材質変化後の炭素鋼中の音速は、材質変化前のそれと同等であると仮定して計算を行うこととする。

(4) 液滴の密度ρ_L

550℃におけるナトリウムの密度は0.832g/cm³(8)であるのに対し、水酸化ナトリウムは1.674g/cm³、酸化ナトリウムは2.270g/cm³、過酸化ナトリウムは1.961g/cm³である(11, 12)。これらの物性値は既知であるが、落下する液滴の組成がどのようなものであるかは不明である。そこで、材質変化後のナトリウムの密度は材質変化前の2倍になる(ほぼすべて水酸化ナトリウムに劣化した考えることに相当する)と仮定した場合と、3倍になる(ほぼすべて酸化ナトリウムに劣化した考えることに相当する)と仮定した場合について計算を行うこととした。

(5) 液滴中の音速C_L

水酸化ナトリウム，酸化ナトリウム，過酸化ナトリウム，これらの混合物およびこれらとナトリウムとの混合物中の音速に関する情報は現状入手できないが，文献(7)によれば，液体中の音速はわずかの例外を除いて1000～1500m/sec.の間であり，温度1℃あたり2～5m/sec.程度減少するものが多い．これに従えば，550℃の液体中の音速は，たかだか数百m/sec.であろうと思われる．本検討において文献(9)に基づいて設定した550℃のナトリウム中における音速は，約2320m/sec.であり，文献(7)に示された値よりかなり大きい値である．これから考えると，ナトリウムの化学変化によって，ナトリウム中の音速が変化するとしても，極端に増加するとは考えにくい．そこで，本検討においては，材質変化後のナトリウム中の音速を，保守的に材質変化前の2倍と仮定して計算を行うこととした．

3. 計算結果

3.1 材質変化を考慮しない場合

(1) 衝突速度を液滴の落下の終局速度とする場合

高温ナトリウムの炭素鋼への衝突速度を、次式で与えられる液滴の終局速度 (1) であると考える。

$$V_t = 965 - 1030e^{-6d} \text{ (cm/sec)} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

(d=4.0mmのとき, 8.72m/sec)

なお、高温ナトリウムは、1次元的に落下するものとし、その落下の頻度を図3.1に示すパラメータd/Dで表すこととした。

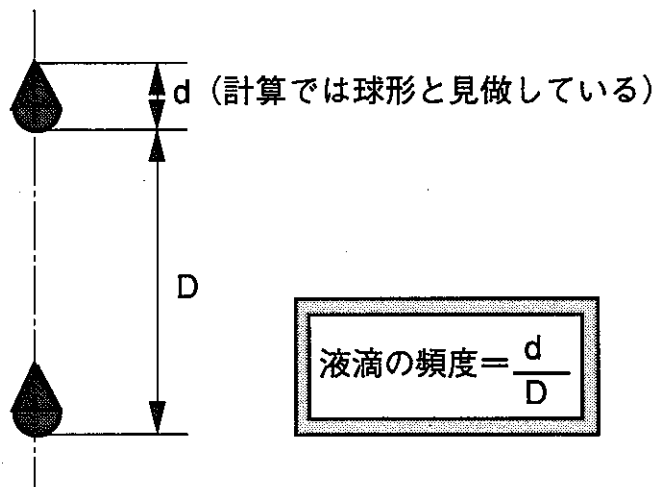


図3.1 液滴の落下頻度を表すパラメータ

(2) 衝突速度を自由落下の速度とする場合

高温ナトリウムの炭素鋼への衝突速度を、空気の抵抗を考えない自由落下する物体の速度と考える。すなわち、

$$V = \sqrt{2gh} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

これらの場合のインキュベーションタイムを計算した結果を表3.1に示す。

表3.1 エロージョンに対するインキュベーションタイム

液滴の密度 d/D	1	1/10	1/100
終局速度	9.04E+11	9.04E+14	9.04E+17
自由落下 (h=1.0m)	8.42E+13	8.42E+16	8.42E+19
〃 (h=3.0m)	2.13E+12	2.13E+15	2.13E+18
〃 (h=10.0m)	3.78E+10	3.78E+13	3.78E+16

(単位：秒)

この表から、最も厳しい条件、すなわち速度14m/sec.の高温ナトリウムが、間断なく滴り落ちる場合を想定しても、エロージョン開始までには、およそ1200年を要することとなり、インキュベーションタイムが極めて大きいことがわかる。

3.2 材質変化を考慮する場合

本節のパラメトリック計算においては、高温ナトリウムは間断なく滴り落ちるものとし、その炭素鋼への衝突速度は、前節(3.1)式で与えられる液滴の終局速度を用いた。表3.2に、インキュベーションタイムのパラメータ計算結果を示す。表中の数値の単位は時間である。

まず、炭素鋼の材質変化がインキュベーションタイムの減少に及ぼす影響について考えてみる。炭素鋼が酸化鉄に変化して引張強さが4分の1に低下したとしても、インキュベーションタイムは材質変化を考慮しない場合の約3000分の1となるが、それでもエロージョンは10年以上経過した後でないと始まらない。この引張強さの低下だけでなく、炭素鋼が酸化鉄に変化したことによる密度の低下も考慮に入れても、まだ、インキュベーションタイムは約9年である。

次に、落下する液体ナトリウムの材質変化がインキュベーションタイムの減少に及ぼす影響について考えてみる。ナトリウムがすべて酸化ナトリウムに変化して密度が3倍になったとしても、インキュベーションタイムは材質変化を考慮しない場合の約1000分の1となるが、それでもエロージョンは約30年経過した後でないと始まらない。この密度の増加だけでなく、仮にナトリウム中の音速が材質変化によって2倍に増加したとすると、インキュベーションタイムはかなり短くなるが、それでもまだ、約2ヶ月以上である。

最後に、炭素鋼とナトリウムの材質変化を同時に考慮する場合のインキュベーションタイムについて考えてみる。炭素鋼に比べて引張強さが引張強さが4分の1に低下した酸化鉄の上に、ナトリウムに比べて密度が3倍の酸化ナトリウムが落下する場合はインキュベーションタイムは約4日である。これに、ナトリウム中の音速が2倍に増加する仮定を考慮すると、インキュベーションタイムは約40分、さらに炭素鋼が酸化鉄に変化したことによる密度の低下も考慮すれば、インキュベーションタイムは約10分にまで短くなる。

表3.2 材質変化がある場合のエロージョンに対するインキュベーションタイム

	パラメータの仮定	インキュベーションタイム
(0)	リファレンスケース	2.51E+08
(1)	材料の引張強さが1/2になった	9.31E+04
(2)	材料の密度が2/3になった	2.17E+08
(4)	液滴の密度が2倍になった	3.61E+06
(5)	液滴の密度が3倍になった	2.61E+05
(6)	液滴中の音速が2倍になった	3.61E+06
(1)×(2)	材料の引張強さが1/2に、 材料の密度が2/3になった	8.03E+04
(1)×(4)	材料の引張強さが1/2に、 液滴の密度が2倍になった	1.33E+03
(1)×(5)	材料の引張強さが1/2に、 液滴の密度が3倍になった	9.67E+01
(1)×(6)	材料の引張強さが1/2に、 液滴中の音速が2倍になった	1.33E+03
(2)×(4)	材料の密度が2/3に、 液滴の密度が2倍になった	2.64E+06
(2)×(5)	材料の密度が2/3に、 液滴の密度が3倍になった	1.59E+05
(2)×(6)	材料の密度が2/3に、 液滴中の音速が2倍になった	2.64E+06
(4)×(6)	液滴の密度が2倍に、 液滴中の音速が2倍になった	3.64E+04
(5)×(6)	液滴の密度が3倍に、 液滴中の音速が2倍になった	1.76E+03

(単位：時間)

	パラメータの仮定	インキュベーションタイム
(1)×(2)×(4)	材料の引張強さが1/2に、 材料の密度が2/3に、 液滴の密度が2倍になった	9.75E+02
(1)×(2)×(5)	材料の引張強さが1/2に、 材料の密度が2/3に、 液滴の密度が3倍になった	5.86E+01
(1)×(2)×(6)	材料の引張強さが1/2に、 材料の密度が2/3に、 液滴中の音速が2倍になった	9.75E+02
(1)×(4)×(6)	材料の引張強さが1/2に、 液滴の密度が2倍に、 液滴中の音速が2倍になった	1.35E+01
(1)×(5)×(6)	材料の引張強さが1/2に、 液滴の密度が3倍に、 液滴中の音速が2倍になった	6.53E-01
(2)×(4)×(6)	材料の密度が2/3に、 液滴の密度が2倍に、 液滴中の音速が2倍になった	1.78E+04
(2)×(5)×(6)	材料の密度が2/3に、 液滴の密度が3倍に、 液滴中の音速が2倍になった	4.86E+02
(1)×(2)×(4)×(6)	材料の引張強さが1/2に、 材料の密度が2/3に、 液滴の密度が2倍に、 液滴中の音速が2倍になった	6.58E+00
(1)×(2)×(5)×(6)	材料の引張強さが1/2に、 材料の密度が2/3に、 液滴の密度が3倍に、 液滴中の音速が2倍になった	1.80E-01

4. 結 言

エロージョン初期において重要な役割を演じるのは疲労であると仮定し、高温の液体ナトリウムが、炭素鋼に一定の速度で滴り落ちる場合のエロージョンの開始までに要する時間（インキュベーションタイム）を計算した。その結果、液体ナトリウムおよび炭素鋼に材質変化がないと仮定した場合、かなり保守的な条件を想定しても、エロージョンに対するインキュベーションタイムは極めて大きくなることがわかった。また、化学反応により炭素鋼が酸化鉄に変化してその引張強さや密度が低下すること、あるいはナトリウムが酸化ナトリウムに変化してその密度が増加し、これに伴ってナトリウム中の音速が増加することを考慮してもなお、インキュベーションタイムは1ヶ月のオーダーを下らない。しかし、炭素鋼およびナトリウムに、化学反応による材質変化が同時に起こることを考慮し、これらの条件を組み合わせた場合には、エロージョンに対するインキュベーションタイムは1時間以下となることもある。

これらのことから、炭素鋼およびナトリウムに化学反応による材質変化が起これなければ、エロージョンによる損傷が起こる可能性は極めて低いといえる。すなわち、高速炉2次系配管でのナトリウム漏洩において、漏洩した高温の液体ナトリウムが構造材に与える損傷の機構としては、エロージョン単独ではこれを考慮する必要がないが、構造材および漏洩ナトリウムに化学反応による材質変化が起こった場合には、エロージョンによる損傷を考慮する必要があるといえる。

5. 参考文献

- (1) G.S.Springer and C.B.Baxi, A Model for Rain Erosion of Homogeneous Materials, Erosion, Wear, and Interface with Corrosion, ASTM STP 567, 1974, pp.106-127.
- (2) J.H.Brunton, Liquid Impact and Material Removal Phenomena, Technical Memorandum No.33-354, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, Calif., June 1967.
- (3) W.C.Leith and A.L.Thompson, Trans. ASME Journal of Basic Engineering, Vol.82D, 1960, pp.795-807.
- (4) R.Mathieson and J.M.Hobbs, Engineering Vol.189, 1960, pp.136-137.
- (5) J.F.Ripken, In Erosion by Cavitation or Impingement, ASTM STP 408, 1967, pp.3-11.
- (6) A.Thiruvengadam, S.L.Rudy and M.Gunasekaran, In Characterization and Determination of Erosion Resistance, ASTM STP 474, 1970, pp.249-287.
- (7) 理科年表, 国立天文台編, 1996.
- (8) J.P.Stone et al., 1965.
- (9) O.J.Foust (Ed.), Liquid Metal Handbook, Sodium and NaK Supplement, Chap.1, LMEC, 1967.
- (10) 金属データブック (改訂2版), 日本金属学会編, 丸善, 1984.
- (11) 理化学辞典 (第3版), 岩波書店.
- (12) 化学辞典, 東京化学同人.

謝 辞

本検討の計算に用いた種々の物性値の決定に際しては、大洗工学センター 安全工学部 機器・構造安全工学室の黒田哲宏研究員から有益な助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。