

漏えい事象の評価手法に関する検討

Study on a method for the evaluation of leakage from pressure retaining components

日本原子力発電（株） 林田 貴一 Kiichi HAYASHIDA Member
日本原子力発電（株） 青木 孝行 Takayuki AOKI Member

This study proposes a method for the evaluation of leakage from pressure retaining components. In this study, leakage from seal portion of components and leakage from flaw due to aging degradation in components are discussed. And methods to estimate a leak rate and its acceptance criteria in the both cases are also discussed. As a result, it was shown that it is possible to prescribe how to estimate a leak rate from seal and flaw, and how to set acceptance criteria.

Keywords: Leakage, Leak Tightness, Pressure Retaining Component,

1. 緒言

一般に、いかなる構造物であっても時間の経過とともに経年劣化（き裂、減肉など）が生じるものであり、産業に用いられている設備機器も同様に、供用の開始とともに徐々に経年劣化が生じる。このため、構造物に経年劣化が発生、進展しても当該構造物の「機能」が常に確保されるように機器を維持管理する必要がある、機能の確保を確実にするために各種の基準が提案されるようになっている。

配管や容器のような機器は、冷却材等の内包流体に対する圧力障壁機能、すなわち当該機器に作用する荷重に耐えようとする役割の「構造強度」機能と、内包流体を外部に漏らさないようにする役割の「水密性」機能という2つの機能を有している。日本機械学会の「維持規格」⁽¹⁾は「水密性」を前提に「構造強度」に着目し、き裂等の欠陥がどの程度まで進展しても機能（安全性）を維持できるかについて評価できる手法を規定している。これに対し、「構造強度」を前提に「水密性」が低下して漏えいが発生した場合を想定し、漏えい事象の評価等に関するガイドラインを開発するための活動が日本保全学会で実施されている⁽²⁾。

本研究では、耐圧機器からの冷却材等の漏えい事象に対し、どの程度の漏えいまで当該機器の機能を維持できるか、また漏えいの評価手法としてどのようなものが考えられるかについて検討した。(Fig. 1, Fig. 2) 以下にその検討内容について述べる。

連絡先：林田貴一、〒101-0053 東京都千代田区神田美土代町1-1、日本原子力発電（株）発電管理室、電話：03-4415-6067、kiichi-hayashida@japc.co.jp

2. 漏えい評価手法

2.1 漏えい率の予測方法

耐圧機器からの漏えいには、大別すると、シール部からの漏えいと、耐圧部材に発生したき裂や減肉など

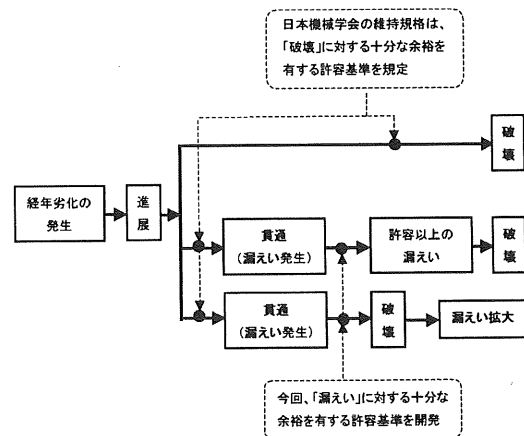


Fig. 1 Relation between a progress of aged degradation and acceptance criteria.

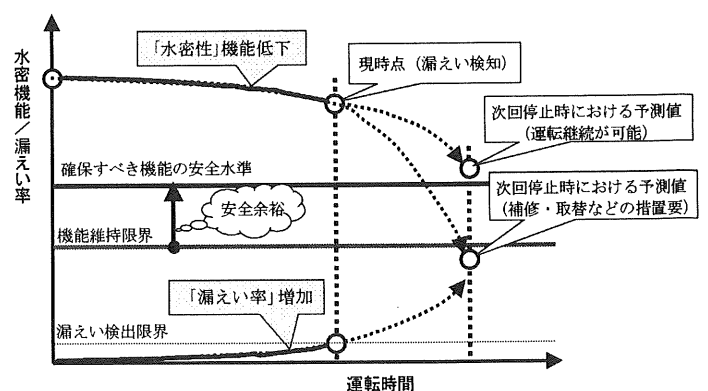


Fig. 2 Safety level to be ensured in leak events.

からの漏えいの2つがある。

(1) シール部からの漏えいの予測方法

シール部からの漏えいは、下記の特徴を有している。

- ・「水密性」が低下し、漏えいが発生、増加しても、「構造強度」は低下しない。
- ・「水密性」を担っているパッキン、ガスケット等（以下、パッキンという。）が劣化し、漏えいが発生、徐々に増加しても、パッキンが完全に無くなった状態にまで増加する可能性があるが、それ以上増加することはない。

また、漏えいが発生する原因としては、a) パッキンの経年劣化、b) パッキンボックスの腐食減肉などによる締め付け圧の低下、c) ボルト締め付け力の低下などが考えられる。

以上を念頭に、下記2つのケースに分けて、漏えい率の予測評価方法を検討する。

* $Q_{max} \leq Q_A$ の場合

* $Q_{max} > Q_A$ の場合

ここで、 Q_{max} はシール部からの最大漏えい率、 Q_A は許容漏えい率である。

① $Q_{max} \leq Q_A$ の場合

シール部からの最大漏えい率 Q_{max} が許容漏えい率以上になることがない場合は、常に機能を維持できるので、基本的に発見された漏えいの増加を予測、評価する必要はない。したがって、シール部からの漏えいの場合、まず始めにこの両者の大小関係を正確に評価、確認することが極めて重要である。

Q_{max} は以下のように計算することができる。

$$Q_{max} = C_Q \cdot \gamma \cdot A_{max} \cdot v \quad (1)$$

ここで

C_Q : 流量係数

γ : 流体の比重

A_{max} : シール部の最大隙間面積（開口面積）

v : 内部流体の流出速度

ただし、この場合でも漏えい発生部が流出する流体で侵食（エロージョン）され、漏えい率が増加することがあるため、特にシール部が炭素鋼製であるような場合は注意が必要である。

② $Q_{max} > Q_A$ の場合

シール部からの最大漏えい率 Q_{max} が許容漏えい率を超える場合は漏えい率の増加を予測評価し、その値が実際の漏えい率と一致し、かつ許容漏えい率

以下であることを常に確認する必要がある。

現時点で考えられる漏えい率の予測評価方法としては下記の2つが挙げられる。

- i) シール部の経年劣化の進行を予測評価してその後の漏えい率を求める方法
- ii) 漏えい発見後の漏えい率の測定実績を外挿してその後の漏えい率を求める方法

前者はパッキンの材質、形状、寸法などの各種条件、金属性シール構造部の材質、構造、寸法、締め付け力などの各種条件、そして使用条件（圧力、温度等）など、多種多様であることから、体系的にデータを収集、分析してシール部の劣化を一般的に予測できるようにすることは困難である。したがって、漏えい率を予測評価する方法としては、後者の漏えい率測定実績を外挿する方法が現実的である。

シール部からの漏えいは徐々に進行し、急激に増加することは少ないと考えられるので、それまでの漏えい率の計測データを外挿し予測する方法が適している。具体的手法としては、下記が考えられる。

(Fig. 3)

- ・ それまでの実測データを多項式で近似し、漏えい率の将来予測を実施する。
- ・ その後、継続的に実測した漏えい率のデータを加えて上記と同様の手法で漏えい率の将来予測を実施する。
- ・ 以上を繰り返すことにより正確な予測を行う。

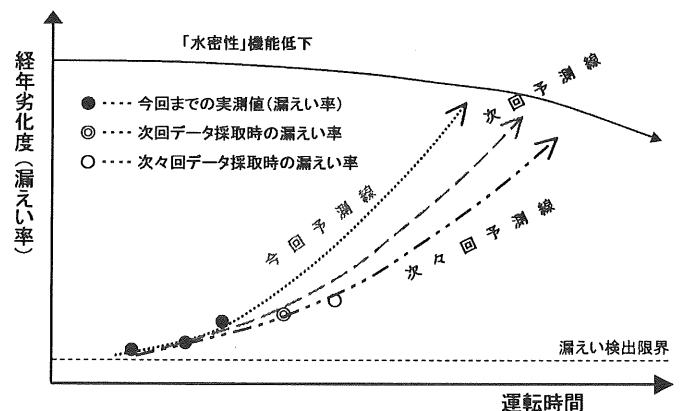


Fig. 3 A method to predict a leak rate by extrapolation.

実測データの外挿で漏えい率を予測するとなると、問題となるのがデータの測定方法と測定時期である。データ測定を行う時期は、当該系統あるいは機器の機能喪失に対して十分な余裕のある時点で行う必要

があり、しかもその時の測定方法は当該系統あるいは機器の機能維持を担保するのに必要な測定精度を有するものである必要がある。これらの関係を Fig. 4 に示す。

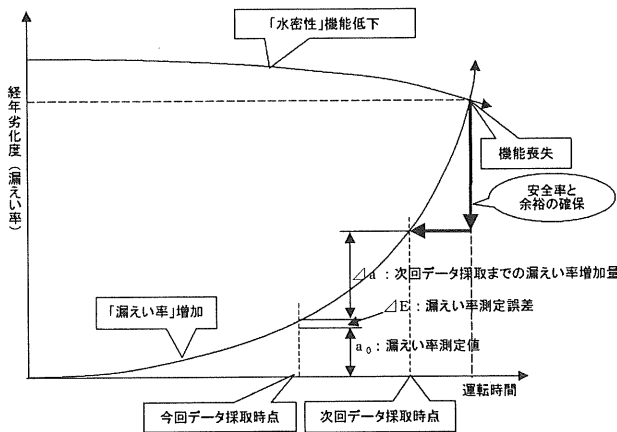


Fig. 4 A method to determine the timing of leak measurement. (3)

(2) き裂や減肉などからの漏えいの予測方法

き裂や減肉などからの漏えいの予測方法としては下記の方法が考えられる。

- i) き裂、減肉の進展速度を評価し、開口面積の増加、すなわち漏えい率の増加を予測、計算する方法
- ii) それまでの漏えい率の計測データを外挿し、漏えい率の増加を予測、計算する方法

以下にこれらの具体的方法について検討する。

① き裂の進展予測から漏えい率を予測する方法

き裂が応力腐食割れ (SCC) の場合、進展速度は下記で与えられる。

$$\frac{d\ell}{dt} = C(K)^n \quad (2)$$

ここで、 ℓ : き裂長さ、 C 、 n : 材料と環境に関する係数、 K : 応力拡大係数である。

したがって、き裂開口面積 A と漏えい率 Q は下記で与えられる。

$$A = \ell \cdot W \quad (3)$$

$$Q = C_Q \cdot \gamma \cdot A \cdot v \quad (4)$$

ここで、 W : き裂幅、 v : 漏えい流体の流出速度 ($= 2g\sqrt{\Delta P/\gamma}$ 、 ΔP : 耐圧機器内外の圧力差) である。

以上のような手法で実際に漏えい率を予測する場合、き裂長さや幅、特に幅の影響は大きいので、保守的な評価となるよう、初期き裂の設定に配慮が必要である。また、き裂進展モデルにも保守性が確保されるよう、配慮する必要がある。

なお、き裂には SCC のほか、疲労割れがあるが、これも同様に下記のように取り扱える。

$$\frac{d\ell}{dN} = \frac{d\ell}{dt} \frac{dt}{dN} = C(\Delta K)^n$$

$$\frac{d\ell}{dt} = C(\Delta K)^n \cdot f \quad (5)$$

ここで、 N : 繰返し回数、 ΔK : 応力拡大係数の変化幅、 f : 周波数 ($= \frac{dN}{dt}$) である。

き裂の場合、き裂幅が狭いので、流出する流体によって侵食 (エロージョン) されると、開口面積への影響が大きく、漏えい率の増加につながる。このため、特にシール部が比較的侵食されやすい炭素鋼製であるような場合は注意が必要である。

一方、減肉開口の進展予測は、き裂と異なり、進展予測データがないので、予測が難しい。この場合は次項に示す漏えい率の実測データから漏えい率を予測する方法を採用することが考えられる。

② 漏えい率の実測データから漏えい率を予測する方法

き裂や減肉開口部からの漏えいも、前述のシール部からの漏えいと同様、それまでの漏えい率の実測データを外挿することにより、その後の漏えい率を予測するという方法が考えられる。

2.2 許容限界漏えい率の評価方法

漏えいを許容するとした場合、それをどの程度まで許容するかが問題となる。そこで許容漏えい率を制限する因子として考えられるものを下記のとおり抽出した。

(1) 系統流量の余裕

機器からの漏えいが生じても当該機器および当該機器が設置されている系統が安定して機能を維持できれば問題ないと考えられる。そのためには当該系統が有している流体輸送能力の余裕以下に漏えいを制限する必要がある。すなわち、下記が成立する必要がある。

$$Q < Q_S = Q_0 - Q_R \quad (6)$$

ここで

Q : 機器に発生している漏えいの量 (漏えい率)

Q_S : 当該系統が有する流体輸送能力の余裕
 Q_0 : 当該系統が有している流体輸送能力(流量)
 Q_R : 当該系統が安定運転するために必要な最小限の流量

である。

(2) ドレン処理可能流量

漏えいが発生している系統が安定して機能を維持できても発生した漏えいをドレンとして処理する必要がある。もしこの処理流量を超えるような漏えいが発生すれば、当該部近傍は漏えいした流体で溢れることになる。このため、漏えい率はドレン処理可能量以下に制限する必要がある。

$$Q < Q_D \quad (7)$$

ここで、 Q_D : ドレン処理可能最大漏えい率である。

(3) 近傍の電気・制御機器への影響

漏えいが発生している近傍に電気・制御機器がある場合、それらが水没したり、水蒸気による悪影響が生じたりする可能性がある。したがって、許容漏えい率を設定する上で近傍にある電気・制御機器を考慮し、漏えい率を一定値以下に制限する必要がある。すなわち、下式が成立する必要がある。

$$Q < Q_E \quad (8)$$

ここで Q_E : 近傍の電気・制御機器に影響が出る最小漏えい率である。

しかしながら、通常は相当量の漏えいが発生しない限り電気・制御機器に悪影響が生じることはないので、特別の場合を除いて、これによって許容漏えい量が決まるケースはないと考えられる。

(4) 運転員や作業員などへの影響

設備の運転中は運転員や作業員が巡視点検や保守作業を実施している可能性があるため、これらの職員の安全を確保する必要がある。したがって、許容漏えい率を設定する上でこれら職員の安全を考慮する必要がある。すなわち、下式が成立する必要がある。

$$Q < Q_H \quad (9)$$

ここで、 Q_H : 運転員や作業員などへ影響が出る最小漏えい率である。

しかしながら、通常は相当量の漏えいが発生しない限り運転員などの安全に影響を与えることはないため、前述の電気・制御機器の場合と同様、特別な場合

を除いて、これによって許容漏えい量が決まるケースはないと考えられる。

以上をまとめると、許容できる最大の漏えい率、すなわち許容限界漏えい率 Q_C は下式で表される。

$$Q_C = \text{MIN.}\{ Q_S, Q_D, Q_E, Q_H \} \quad (10)$$

また、前述のように、近傍の電気・制御機器への影響や運転員などへの影響が生じるような漏えいは発生する可能性が少ないと考えられるので、これらを除外すると、許容限界漏えい率 Q_C は下式で表される。

$$Q_C = \text{MIN.}\{ Q_S, Q_D \} \quad (11)$$

2.3 許容漏えい率の設定方法

前節で述べた許容限界漏えい率は文字通り許容できる限界(最大)の漏えい率であるので、発生した漏えいを問題なく管理するには、これに十分な安全率を確保した管理基準、すなわち「許容漏えい率 Q_A 」を下式のように設定し、常に漏えい率がこれ以下となるように漏えいを管理する必要がある。(Fig. 5)

$$Q_A = Q_C / SF \quad (12)$$

ここで SF は安全率である。この安全率を具体的にどの程度の値とするかについては今後の課題であるが、この決定に際して少なくとも下記を考慮することが必要である。

- i) 漏えいの発生している系統あるいは機器の安全重要度
- ii) 漏えい率の予測精度
- iii) 実際の漏えい率の測定精度

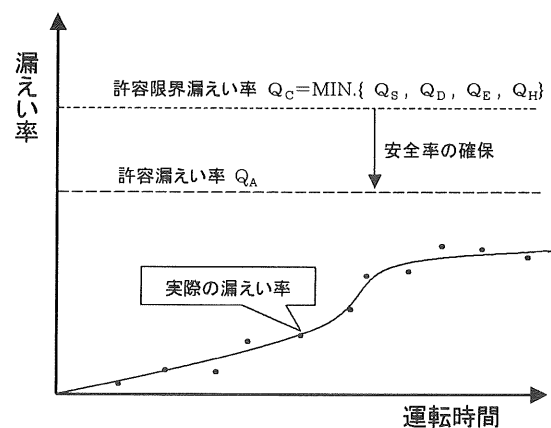


Fig. 5 Relation between critical and acceptable leak rate.

3. 結言

- (1) 耐圧機器のシール部および経年劣化した耐圧部材からの漏えいを想定して漏えい率の予測評価方法および許容漏えい率の設定方法について検討した。
- (2) その結果、漏えい率の予測評価方法、許容漏えい率の設定方法とも具体的に規定することが可能であることを確認した。
- (3) 今後は適切な保守性を持たせた具体的な規定案を検討する必要がある。

参考文献

- [1] 日本機械学会、発電用原子力設備規格 維持規格、2002年改訂版。
- [2] 日本保全学会 漏えい事象評価研究分科会、“漏えい事象評価研究分科会の活動状況”、(日本保全学会「保全学」、Vol.4、No.2、2005に発表予定)。
- [3] 青木孝行、宮健三、高瀬健太郎、千種直樹、“保全学の構築に向けて(4) - 「保全工学」構築のアプローチ - ”、日本保全学会「保全学」、Vol.3、No.1、2004、pp.57-69。