技術報告

384. 使用済燃料輸送・貯蔵キャスクの長期密封性能試験

伊藤 千浩^{1,*}, 加藤 治², 三枝 利有¹*Long Term Containment Performance Test for Spent Fuel Transport/Storage Casks*

Chihiro ITOH, Osamu KATOH and Toshiari SAEGUSA

The use of transport/storage cask for spent fuel storage is considered to be rational and economical. Since the storage duration may continue for 40 years or so, the function of sealing radioactive materials in the casks must be reliable for long-term. Long-term containment test of full-scale spent fuel transport/storage cask models have been in progress since 1990 in CRIEPI, Japan. It has been 11 years since it started. The results so far demonstrate and confirm very reliable containment performance of the cask lid structure with metal gaskets. Using the test data it is predicted by Larson-Miller Parameter (LMP) method that the containment system will keep its integrity at least for 40 years.

KEYWORDS: spent fuel, storage, long-term containment, metal gasket, Larson Miller parameter

I. 緒 言

使用済燃料貯蔵キャスクにおいては、長期間にわたる信頼性の高い密封性能が求められるため、蓋部のシール材として耐久性・耐熱性を勘案し、金属製のガスケットが使用されている。電力中央研究所では、これまでに2種類の蓋部実物大モデルを用いた密封性能確認試験を約11年間にわたって行い(現在も継続中)、長期データを取得し、この間の密封性能が健全であることを確認するとともに、本試験結果を用いて、実貯蔵において40年間は密封性能が健全であることを評価した。本報では、密封試験結果の最新のデータを示すとともに、これらのデータに基づいた長期密封性能について評価した結果について述べる。なお、本試験は経済産業省からの委託研究において実施したものである。

II. 金属ガスケットの長期密封性能試験

1. 試験条件

本試験では、2種類の蓋部実物大モデルを用い、モデル内部に使用済燃料の崩壊熱を模擬するためヒーターを設置した。試験に用いた実寸モデルを Fig. 1 および 2 に示す。おのおののモデルに用いた金属ガスケットは、以下の材料より構成されている。

I 型: コイルスプリング/インコネル, 被覆材/インコネル, アルミニウム

II 型: コイルスプリング/インコネル, 被覆材/インコネル, 銀

¹ 電力中央研究所 (Central Res. Inst. of Electr. Power Ind.)

² ㈱シー・アール・エス (Central Res. Service)

(2002年 11月28日 受理; 2003年 1月23日 査読通過)

* 著者連絡先: Tel. 047-182-1181, Fax. 047-183-2962,
E-mail: ito@crieppi.denken.or.jp

貯蔵時のキャスク蓋部の温度を推定するため、3種類の実物キャスク(ここでは、キャスク A, B, C とする)を対象として、以下の燃料条件を用いて、ORIGEN2 により崩壊熱の経年変化を算出した。

形 式: PWR-17×17 21 体収納

燃 焼 度: 43,000 MWd/MTU

比 出 力: 38.3 MW/MTU

濃 縮 度: 4.1%

冷却期間: 5 年

次に、この結果を用いて ABAQUS コードにより伝熱解

Fig. 1 Detail of Type I model

Fig. 2 Detail of Type II model

Fig. 3 Analytical result on history of temperature at containment area

析を実施した。Fig. 3に温度の履歴を示す。解析の結果、燃料装荷時における1次蓋ガスケット部の最高温度として157°C(タイプC)が得られた。これより、試験では保守側の結果を得るため設定温度を160°Cとするとともに、実際の貯蔵では、時間の経過とともに温度が低下するところを160°C一定として試験を行うこととした。

密封性能は2次蓋ガスケット部に対し、Heリーク試験法により定期的(1回/2週間)に漏洩率を測定するとともに、1次蓋の密封性については蓋間の圧力を測定することにより評価した。Heリーク試験の概要をFig. 4に示す。

Fig. 4 Outline of the long-term containment performance test

Fig. 5 History of temperature

2. 試験結果

試験開始(1990年10月)から2002年3月末現在までの温度の経時変化をFig. 5に示す。環境温度(実験棟内)の季節変動(約38~10°C)により、2次蓋ガスケット部の温度は、夏と冬で6°C(II型モデル)~10°C(I型モデル)程度の温度変動が認められた。

試験開始(1990年10月)から2002年3月末現在までの2次蓋の漏洩率の経時変化をFig. 6に示す。試験開始から約11年が経過したが、漏洩率の変化はなく、いずれのモデルも試験開始時の密封性能を保持していることが確認された。また、初期の蓋間およびキャビティ内圧力の値をTable 1に示すとともに、蓋間圧力の経時変化をFig. 7に示す。いずれの試験体においても蓋間圧力の低下はなく、上述のように、2次蓋の密封性が保持されていることを考慮すると1次蓋の密封性能も保持されているものと判断される。

Fig. 6 History of leakage rate

Table 1 Test conditions

Item	Type I model	Type II model
Temperature at containment area (°C)	160	160
Pressure in space between lids (MPa)	0.4	0.6
Pressure in cask cavity (MPa)	0.08	0.08

Fig. 7 History of pressure in space between lids

III. 長期密封性能の推定

1. 概要

長期密封性能試験は一定温度(1次ガスケット部:160℃)で現在までに約11年間実施したものであるが、実貯蔵時には使用済燃料の崩壊熱の減衰によりキャスク各部の温度は時間経過とともに低下する。このようなことから、本試験が実貯蔵条件に対し、加速試験となっているものと考え、本試験条件と実貯蔵時のキャスク温度の解析結果をもとに、Larson-Millerパラメータを用いて、より長期の密封性能の推定を行った。

2. 金属ガスケットの応力緩和現象と Larson-Miller パラメータ

キャスクの密封装置は、金属ガスケットを矩形断面の溝内に装着し、ボルト締付力によって一定量の圧縮変形を与え、金属ガスケットとフランジ接触面(蓋・胴)と密着させ、その際の金属ガスケットの弾性復元力によって密封性能を維持する仕組みとなっている(Fig. 8 参照)。

金属ガスケットを高温で使用した場合、金属ガスケット構成材のクリープによる応力緩和によって、時間経過とともに弾性復元力が減少していき、密封性能に影響を及ぼすことが実験的に明らかにされている¹⁾。また、同時に、Larson-Millerパラメータ(LMP)²⁾と次式で定義される塑性変形率 D_p (Fig. 9 参照)の間には、Fig. 10 a)に示すように、よい相関関係があることが明らかにされている³⁾。

Larson-Miller パラメータ

$$LMP = T(C + \log t)$$

ここで、 T : 温度(K)

t : 時間(h)

塑性変形率

$$D_p = \frac{d_0 - d_2}{d_0 - d_1} \times 100(\%)$$

ここで、 d_0 : 試験前の断面径

d_1 : 溝の深さ

d_2 : 試験後の断面径

Fig. 8 Detail of metallic gasket

Fig. 9 Definition of plastic deformation ratio (D_p) of gasket Fig. 10 Relation among plastic deformation ratio (D_p), leakage rate and LMP

さらに、Fig. 10 b)に示されるように、塑性変形率がある値を超える(すなわち、定義から明らかなように、塑性変形率が大きくなると弾性復元力が小さくなるため)と密封性能が低下する³⁾。

このことは、温度と時間が異なっても LMP の値が同じであれば、密封に対する金属ガスケットの影響は同じであるということがいえる。

なお、LMP に含まれる定数 C については実用上、 $C=20$ としても十分であるとしている。しかし、厳密には、定数 C は材料および応力に依存するものと考えられる。ここでは、定数 C の最適化を図るため、 C を 5~50 の範囲で変化させ、塑性変形率と LMP の関係を直線近似し、個々のデータの直線に対する標準誤差を求め、これが最小となるときの値を C とすることとした。この結果、Fig. 11に示すように、Type I 型モデルで使用された金属ガスケット I (Fig. 10のガスケット C と同じもの)および Type II 型モデルで使用された金属ガスケット II とともに、 $C=20$ において標準誤差が最小となることから、本評価では $C=20$ を用いた。

3. 長期密封性能の推定

本試験は一定温度(160℃)で現在までに約11年間実施したものである。一方、実貯蔵時においては、使用済燃料の崩壊熱の減衰によりキャスクの温度は時間経過とともに低下する。したがって、本試験は実現象に対して加速試験となっているものと考え、本試験条件と解析で得られた実貯蔵時のキャスク温度と時間を LMP で表して長期密封性能の推定を行った。Fig. 12に試験時および前述した燃料条件より求めた蓋密封部温度の経時変化を示し、Fig. 13に試験条件から得られる LMP と実貯蔵時の条件から得られる LMP の値を示す。この図より、試験において11年目における LMP の値は10.850で、実貯蔵において、この LMP 値に相当する経過年数は40年強となることがわかる。すなわち、現在までの約11年間にわたって行ってきた本試験は、LMP による評価から、実貯蔵時の約40年間に相当するものであり、この期間の金属ガスケットの密封性能は健全であるということがいえる。

Fig. 11 Relation between standard deviation and constant C

Fig. 12 Comparison between analysis and experiment on history of temperature at containment area during storage

Fig. 13 Estimation of long-term containment performance during storage, by experiment and analysis

IV. ま と め

本研究において、2種類のキャスクの実物大蓋部モデルを用いた長期密封性能試験より、現在まで約11年間密封性能の低下は見られない。

また、Larson-Millerパラメータ(LMP)を用いた評価により、長期密封性能の推定を行った結果、少なくとも40年間密封性能の健全性は保持されるものと評価された。

— 参考文献 —

- 1) 加藤 治, 伊藤千浩, 使用済燃料貯蔵容器用ガスケットの長期密封特性, 電中研研究報告 U92009, (1992).
- 2) F. R. Larson, J. Miller, "A time-temperature relationship for rupture and creep stresses", *Trans. ASME*, **74**, 765~775 (1952).
- 3) 加藤 治, 伊藤千浩, 三枝利有, "使用済燃料貯蔵キャスクの長期密封性能評価手法の開発", 原子力誌, **38**[6], 95~101 (1996).